

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

AMAURI LUIS MOCKI JUNIOR

EQUALIZADOR DINÂMICO DE POTÊNCIAS ÓTICAS EM REDES WDM

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do grau de “Mestre em Ciências” – Área de Concentração: Telemática.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre de Almeida Prado Pohl

Curitiba

2006

AGRADECIMENTOS

À Fundação CPqD e Projeto GIGA, FINEP, FUNTTEL e MCT, pelo apoio e pelos recursos disponibilizados para que este trabalho fosse executado.

Ao professor e orientador, Dr. Alexandre A. P. Pohl, pela confiança, incentivo e esforços direcionados para que a pesquisa pudesse ser concluída satisfatoriamente.

Ao Fabio Donati Simões, da Fundação CPqD, pelos dados de medidas da Rede Giga que contribuíram na obtenção de resultados simulados mais próximos do real.

Aos bolsistas, Tiago, Eduardo e Paulo, pelo excelente trabalho realizado no desenvolvimento deste projeto.

Ao CPGEI, pela qualidade de ensino e dos professores que auxiliaram para a formação de conhecimentos necessários para que este trabalho pudesse ser concluído.

À UTFPR, pelos 14 anos de ensino e formação, desde o curso preparatório para o segundo grau técnico até o final do mestrado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xii
RESUMO.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 MOTIVAÇÕES.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	4
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	5
2 FATORES DE DEGRADAÇÃO.....	7
2.1 AMPLIFICADOR ÓTICO A FIBRA DOPADA COM ÉRBIO.....	7
2.1.1 Introdução.....	7
2.1.2 Operação do EDFA.....	7
2.1.3 Curva de ganho.....	9
2.1.4 Causadores de degradação relacionados ao EDFA.....	11
3 TECNICAS DE EQUALIZAÇÃO.....	17
3.1 METODOS DE EQUALIZAÇÃO.....	17
3.1.1 Método da Pré-Ênfase.....	17
3.1.2 Método da planificação do Ganho.....	18
3.1.3 Método de Equalização Utilizando Atenuadores Óticos.....	20
3.2 TRANSIENTES DE GANHO.....	22
3.2.1 Supressão Totalmente Ótica.....	23
3.2.2 Controle Automático de Bombeamento.....	26
4 EQUALIZADOR DINÂMICO DE POTÊNCIAS ÓTICAS.....	31
4.1 INTRODUÇÃO.....	31
4.2 MODELO DE EQUALIZAÇÃO.....	31
4.3 ATENUADORES MEMS E DISPOSITIVO DE ATENUAÇÃO.....	33
4.4 FOTODETECTORES.....	37
4.5 CONTROLE E ALGORITMO DE EQUALIZAÇÃO.....	40
4.6 SIMULAÇÕES DO SISTEMA DE EQUALIZAÇÃO.....	42

4.6.1 <i>VPItransmissionMaker</i> [®] e <i>VPIcomponentMaker</i> [®]	42
4.6.2 Rede Giga.....	46
4.6.3 Equalizador Dinâmico de Potências Óticas.....	53
4.6.4 Controle de Laser de Bombeamento do EDFA.....	58
5 RESULTADOS E CONCLUSÕES	61
5.1 RESULTADOS SIMULADOS.....	61
5.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	71
5.3 CONCLUSÕES.....	76
5.4 TRABALHOS FUTUROS.....	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

LISTA DE FIGURAS

1.1	Resultado simulado apresentado por Chraplyvy.....	4
2.1	Modelo do EDFA.....	8
2.2	Níveis de energia na fibra dopada.....	9
2.3	Perfil de ganho do EDFA.....	9
2.4	Variação do ganho do amplificador, com relação à potência de entrada para quatro potências de bombeamento.....	11
2.5	Alteração do perfil de ganho para diferentes potências de bombeamento.....	11
2.6	Contribuição do <i>crosstalk</i> nos canais.....	13
2.7	Máxima potência por canal em relação à quantidade de canais.....	15
2.8	Transientes de ganho do EDFA.....	16
3.1	Método da Pré-Ênfase.....	18
3.2	Planificação do ganho do EDFA utilizando CFBG.....	19
3.3	<i>Tilt</i> de potências quando o canal 58 é retirado.....	20
3.4	Micro VOA da <i>Boston Applied Technologies</i>	21
3.5	Modelo de equalização dinâmica utilizando VOAs.....	22
3.6	Realimentação ótica para supressão de transientes.....	23
3.7	Oscilações de relaxação e SHB.....	25
3.8	Modelo de controle automático de ganho eletrônico.....	26
3.9	Controle de Bombeamento Simulado.....	27
4.1	Modelo do Equalizador.....	32
4.2	Matriz de espelhos MEMS comparados a uma agulha de costura.....	34
4.3	Modelo de montagem e Curvas de atenuação dos VOAs.....	35
4.4	Valores de tensão de saída do amplificador de transimpedância.....	39
4.5	Exemplos de simulações que o VPI é capaz de realizar.....	44
4.6	Ambiente de simulação do VPI.....	45
4.7	Rede GIGA.....	48
4.8	Modelo da Rede GIGA criado no VPI.....	49
4.9	Perfil de ganho dos amplificadores da Rede Giga.....	51
4.10	Potências óticas na recepção.....	53
4.11	Diagrama do EDPO simulado.....	54

LISTA DE FIGURAS

4.12	Potências equalizadas na saída do EDPO.....	56
4.13	Nova versão do EDPO criado totalmente com blocos do VPI.....	57
4.14	Controle de laser de bombeamento simulado.....	58
4.15	Transientes de potência do EDFA.....	59
5.1	Algoritmo de equalização em funcionamento.....	62
5.2	Desigualdade de potências na recepção sem equalização.....	63
5.3	OSNR por canal transmitido.....	64
5.4	Potência dos canais no receptor com nenhum, um e dois EDPO's instalados.....	65
5.5	OSNR x comprimento de onda, com e sem equalizadores inseridos no enlace....	66
5.6	<i>Loop</i> de amplificação simulado.....	68
5.7	Comportamento da BER com e sem equalizadores.....	70
5.8	EDPO versão 1.....	71
5.9	Diagrama de montagem de teste.....	72
5.10	Atuação do EDPO em laboratório.....	73
5.11	Protótipo final do EDPO.....	75

LISTA DE TABELAS

3.1	Quadro comparativo entre métodos de equalização e controle de ganho.....	28
4.1	Comparativo entre dados de tabela e valores medidos.....	38
4.2	Características do componentes óticos.....	42
4.3	Comprimentos de onda e frequências do sistema.....	46
4.4	Características de dispersão da Rede Giga.....	50
4.5	Características de Compensação.....	50
5.1	Comparativo resultados de equalização.....	67
5.2	Resultado de equalização no <i>loop</i>	68
5.3	Erro de medida do EDPO.....	73
5.4	Quadro comparativo de resultados com equalizadores	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>
A/D	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
CFBG	<i>Chirped Fiber Bragg Grating</i>
CPqD	Centro de Pesquisa e Desenvolvimento
D/A	<i>Digital-to-Analog Converter</i>
dB	Decibel
dBm	Decibel com relação a milivolts ou miliwatts
DCF	<i>Dispersion Compensated Fiber</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>
EDPO	Equalizador Dinâmico de Potências Óticas
FWM	<i>Four Wave Mixing</i>
Gbps	Gigabits por segundo (10^9 bits por segundo)
GFF	<i>Gain Flattening Filter</i>
GHz	Giga Hertz
GPiB	<i>General Purpose Interface Bus</i>
IHM	Interface homem-máquina
Km	Quiilômetro
LPG	<i>Long-Period Grating</i>
MEMS	<i>Micro Eletro-Mechanical System</i>
MHz	Mega Hertz
nm	Nanometro (10^{-9} metros)
OADM	<i>Optical Add/Drop Multiplexer</i>
OSRN	<i>Optical Signal-to-Noise Ratio</i>
OXC	<i>Optical Cross Connect</i>
SBS	<i>Stimulated Brillouin Scattering</i>
SHB	<i>Spectral Hole Burning</i>
SMF	<i>Single Mode Fiber</i>
SRS	<i>Stimulated Ramam Scattering</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

VOA Variable Optical Attenuator
WDM Wavelength Division Multiplexing

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a apresentação de um sistema de equalização dinâmica de potências óticas para ser utilizado em redes WDM (*Wavelength Division Multiplexing*). Simulações foram executadas usando a Rede Giga como base. Para se desenvolver um sistema completo, várias técnicas de equalização foram estudadas. Uma técnica utilizando VOA's (*Variable Optical Attenuator*) é demonstrada para oito canais WDM. As características dos amplificadores óticos, como banda de amplificação e transientes de ganho foram testadas. Este trabalho envolve a especificação de componentes óticos para tornar o sistema possível. Fotodetectores, multiplexadores e demultiplexadores são utilizados como componentes do equipamento. Ao final, um sistema totalmente operacional é demonstrado para oito canais WDM com espaçamento de 200GHz, com capacidade de expansão para dezesseis canais. Futuras modificações do sistema também são comentadas.

ABSTRACT

This work presents a system for dynamic power gain equalization in WDM networks. Simulations have been developed having the Rede Giga test bed as the initial point. In order to develop a complete system, several types of equalization schemes have been studied, and a method using VOA's (Variable optical Attenuator) is shown for eight WDM channels. The characteristics of the optical amplifiers, like amplification band and gain transients have been tested. This work involves the specification of optical components to make the system possible. Photo detectors, Multiplexers and Demultiplexers are used to compose the equipment. At the end, a fully operational equipment is demonstrated for eight channels, 200GHz spaced WDM system, with capability to expand to sixteen WDM channels. Future modifications and improvements are commented too.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÕES

Nos últimos anos, com o aumento dos usuários de sistemas de comunicação e de serviços, tem-se requerido um esforço considerável no tocante a novas tecnologias. Os sistemas óticos de transmissão de dados vêm sofrendo uma transformação, migrando de sistemas estáticos, que interligam grandes centros, para sistemas dinâmicos, que permitem roteamento de comprimentos de onda para onde eles forem necessários, chegando até mesmo à casa do usuário.

Quando começaram a ser utilizadas (os primeiros sistemas óticos comerciais surgiram na década de 70) (HECHT,1999), as redes óticas consistiam apenas de um comprimento de onda de 850nm, utilizando a primeira janela de comunicação disponível. A atenuação das fibras neste comprimento de onda é muito grande, e dessa forma os sistemas não permitiam enlaces de grandes distâncias. As tecnologias óticas evoluíram passando a utilizar comprimento de onda em torno de 1310nm, aproveitando a segunda janela de transmissão, com atenuações menores, estendendo o alcance dos enlaces óticos.

A expansão dos sistemas óticos prossegue, e sistemas operando em 1550nm, com atenuação na fibra da ordem de 0,2dB/km, começam a ser utilizados, e os primeiros amplificadores óticos a fibra dopada são desenvolvidos (AGRAWAL e BOYD, 2002).

Essas novas tecnologias se disseminaram muito rapidamente, e o crescimento no número de usuários leva a utilização de mais comprimentos de onda por fibra, com o intuito de aumentar a capacidade de transmissão dos sistemas atuais. Essa técnica é conhecida como WDM (*Wavelength Division Multiplexing*).

Os sistemas WDM, que carregavam poucos comprimentos de onda, evoluem para sistemas com muitos comprimentos de onda (DWDM – *Dense Wavelength Division Multiplexing*), aumentando a banda de transmissão e possibilitando um maior número de usuários. Sistemas com um grande número de portadoras óticas, cada uma operando a taxas muitas altas, são cada vez mais comuns.

As distâncias dos enlaces óticos aumentam, significando o uso de um numero maior de amplificadores de linha, para que o sinal possa chegar ao seu destino.

As redes eram utilizadas para interligar pontos distantes e o percurso, uma vez definido, não se alterava. Entretanto, com a criação de dispositivos capazes de manipular as rotas das portadoras óticas, como interconexões óticas (OXC – *Optical Cross Connect*) e Módulos de inserção e Derivação Ótica (OADM – *Optical Add/Drop Multiplexer*), os sistemas óticos começam a se tornar cada vez mais dinâmicos.

Com maiores distâncias, taxas de transmissão mais altas e roteamento dinâmico de comprimentos de onda aumenta a necessidade de desenvolvimento de tecnologias que garantem a integridade dos sinais transmitidos.

Os amplificadores óticos atuais ainda possuem características que podem vir a degradar o sinal ótico. As imperfeições existentes nestes equipamentos precisam ser corrigidas (CHRAPLYVY, NAGEL e TKACH, 1992; ZHOU, WANG, YU, *et al.*, 2000; PAVEL, 2002; MEHTA, 2003).

Para que se possa utilizar toda a banda de ganho do amplificador, criando a possibilidade de inserção de um maior número de canais, é necessário que o ganho seja aproximadamente igual em toda a banda, o que, nos sistemas atuais, não acontece. Esse fato torna-se pior à medida que o número de amplificadores na rede aumenta, pois as diferenças de ganho ao longo do enlace ótico se acumulam.

Alem de impedir o uso de toda banda de amplificação, as diferenças de ganho podem gerar efeitos degenerativos no sinal transmitido, como interferência entre canais adjacentes que ocorrem nos filtros presentes no enlace (*crosstalk* linear) e fenômenos não lineares na fibra, relacionados à potência ótica transmitida por canal (CHRAPLYVY, 1990).

Em redes dinâmicas, tem-se ainda o problema dos transientes de ganho gerados pelo amplificador ótico, quando ocorre uma variação na potência de entrada total (PAVEL, 2002). O ganho do amplificador ótico sofre uma alteração e afeta todos os canais presentes, alterando suas potências. Esse efeito acumula-se ao longo do enlace e pode gerar efeitos não lineares na fibra, degradando o sinal.

Os pontos citados são alguns dos mecanismos que contribuem para a geração das diferenças de potências entre os canais WDM. A necessidade de um mecanismo capaz de equalizar as potências óticas dos canais presentes no meio de comunicação torna-se importante para os meios de comunicação ótica. Mais que isso, um mecanismo que possa operar tanto nas redes estáticas quanto em redes dinâmicas, de forma a melhorar o desempenho das redes de comunicação ótica, aumentando a capacidade e confiabilidade.

Vários estudos têm sido feitos sobre equalização de ganho e as melhorias apresentadas aos sistemas de comunicação ótica, no tocante a OSNR (*Optical Signal to Noise Ratio*) e BER

(*Bit Error Rate*), e diversos métodos de equalização, linearização e controle automático de ganho de EDFAs (*Erbium Doped Fiber Amplifier*). (LUO, ZYSKIND, NAGEL, *et al.*,1998; GUY, LAUZON, ROCHETTE, *et al.*,2000; BONONI e RUSCH, 1998; BONONI, TRANCEVSKI e RUSCH, January 1999; BONONI, TRANCEVSKI e RUSCH, May 1999; CHEN, VISIONE, e PAVLIK, 2002).

Sem a planificação do ganho do EDFA é impossível lançar na fibra sinais óticos na banda de alto ganho e na banda de baixo ganho ao mesmo tempo, reduzindo o número de canais possíveis.

Os sistemas óticos normalmente operam no seu limite, e a não equalização dos canais e os transientes de ganho do EDFA podem levar a momentos em que esses limites são ultrapassados, degenerando os sinais no receptor.

Chraplyvy (CHRAPLYVY, NAGEL e TKACH, 1992) faz um estudo sobre equalização com simulações, mostrando as melhorias que um sistema de equalização pode agregar aos sistemas óticos. Os resultados observados nas figuras 1.1(a) e 1.1(b) são resultados simulados de um algoritmo de equalização que utiliza uma técnica de pré-ênfase para obter a equalização das potências no receptor, usando o sistema de telemetria de um enlace para obter os valores das potências. As simulações indicam que o OSNR pode ser melhorado (e equalizado). As figuras 1.1(a) e 1.1(b) mostram os resultados obtidos por Chraplyvy para uma transmissão de 840 km de fibra. A figura 1.1(a) é o resultado do sistema sem equalização de potências, enquanto a figura 1.1(b) mostra o resultado do sistema equalizado, usando um algoritmo simulado. A linha contínua mostra o nível do ruído óptico acumulado ao longo do enlace, os triângulos representam as potências óticas dos canais utilizados. O gráfico traz também a informação de potência ótica de entrada (transmissor), potência de saída (receptor), S/N e BER para todos os canais. As melhorias propostas pela equalização são evidenciadas pelos valores mostrados nos gráficos, onde os resultados aparecem na forma de um ganho significativo nos canais com OSNR baixos, BER com valor zero em todos os canais e o mesmo OSNR em todos os canais.

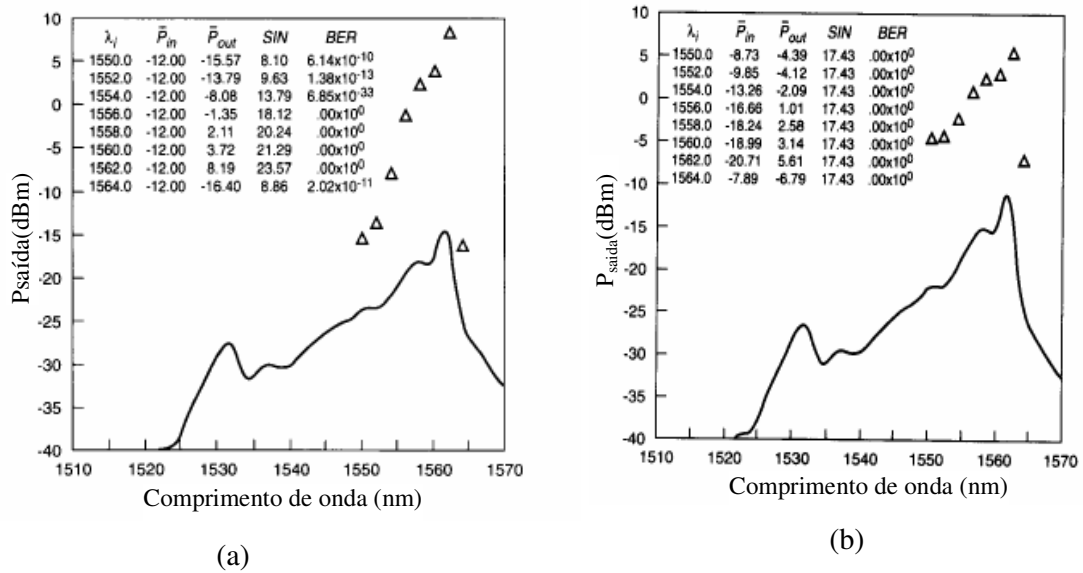


Figura 1.1: Resultado simulado apresentado por Chraplyvy (CHRAPLYVY, NAGEL e TKACH, 1992). (a) sem algoritmo de equalização e; (b) com algoritmo de equalização. O OSNR está equalizado e a BER é zero em todos os canais.

Em vista dos diversos trabalhos já desenvolvidos e a mobilização de esforços de vários pesquisadores para melhorias dos enlaces óticos, este trabalho procura complementar e auxiliar da melhor forma possível o desenvolvimento de soluções para equalização de redes WDM.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema capaz de equalizar as potências de oito canais óticos com espaçamento de 200GHz em redes WDM. Essa equalização deve ser feita de forma dinâmica e permitir a expansão para 16 canais.

O sistema deve conter funcionalidades de atenuação total e forçada de qualquer canal e operação automática de equalização. A atenuação forçada poderá ser feita de forma independente para cada canal. O sistema deverá ter as medidas das potências de entrada, atenuação aplicada e potência de saída de cada canal. Assim o dispositivo passa a ser mais que um equalizador, tornando-se um sistema básico de supervisão e atuação no enlace.

Para o projeto do sistema é preciso estudar as melhores formas e métodos de equalização, para que seja possível definir o melhor modelo de equalização a ser utilizado. É

necessário também verificar as características de funcionamento dos EDFAs, e o seu impacto sobre as redes óticas, para que o sistema possa ser avaliado de forma correta e verificado até que ponto ele pode corrigir os problemas inseridos pelos amplificadores.

Para efeito de projeto e futura validação do sistema desenvolvido, a Rede GIGA será utilizada como referência (SCARABUCCI, PARADISI, BARROS, *et al*; 2005), portanto todas as simulações utilizarão valores de medidas realizadas pela Fundação CPqD. Em laboratório, entretanto, serão utilizados dispositivos escolhidos para o projeto, como forma de comparação, pois o sistema proposto não deve ficar restrito às características de operação de um único enlace.

Para tanto, os componentes óticos presentes no sistema devem ser avaliados e suas características verificadas. Como será visto no Capítulo 4, os componentes serão testados individualmente e suas características serão comparadas com as especificações dos fabricantes. Os componentes não óticos serão igualmente validados e escolhidos com base em resultados simulados e no conhecimento dos participantes do projeto, de forma a facilitar o desenvolvimento.

Os objetivos a serem atingidos com a equalização de potências óticas são basicamente três: planificação de perfil de ganho dos amplificadores óticos, neste trabalho baseado em EDFA's; aumento de OSNR e redução da BER nos enlaces, causados pela não equalização das potências do enlace.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos, incluindo esta introdução. No Capítulo 2 faz-se uma revisão sobre os princípios de funcionamento dos EDFA's e explicam-se os fatores relacionados às características de interesse para este trabalho, como o *crosstalk* e fenômenos não lineares que podem ocorrer na fibra e que se relacionam com a potência ótica a elas aplicada.

O Capítulo 3 relata alguns métodos comumente utilizados para equalização e controle automático de ganho no EDFA, suas vantagens e suas desvantagens de forma que a escolha do esquema de equalização usado no projeto seja válida.

O Capítulo 4 apresenta o modelo de EDPO (Equalizador Dinâmico de Potências Óticas) proposto, simulações de equalização e controle de ganho, bem como os métodos utilizados e resultados obtidos. É apresentado também o EDPO já como sistema físico, metodologia de escolha de componentes óticos e sua validação.

O Capítulo 5 discute sobre os resultados obtidos no Capítulo 4, bem como as conclusões, sugestões de melhorias e trabalhos a serem executados futuramente.

Os resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho foram aceitos para apresentação em duas conferências e são listados abaixo.

- A. Mocki Jr, H. J. Kalinowski and Alexandre A. P. Pohl, "Design and Simulation of an In-Line Optical Gain Equalizer for application in WDM Systems", Proceedings of 7th International Conference on Transparent Optical Networks, pp 221-224, Barcelona, Spain, 2005.

- A. Mocki Jr., Tiago Moraes do Amaral and Alexandre A.P. Pohl, "8-Channel Optical Power Equalizer for WDM Networks", VI International Telecommunications Symposium CD-ROM, pp 1033-1036, Fortaleza, Brazil, 2006.

CAPÍTULO 2

FATORES DE DEGRADAÇÃO

2.1 AMPLICADOR ÓTICO À FIBRA DOPADA COM ÉRBIO

2.1.1 Introdução

Antes da descoberta da amplificação ótica através de fibras dopadas com íons da família terras raras (KOESTER, SNITZER, 1964), regeneradores elétricos eram utilizados nos enlaces óticos. Estes dispositivos executavam a conversão do sinal ótico para o elétrico e novamente para o ótico para que a regeneração pudesse ser efetuada.

Esse tipo de regeneração depende do formato da modulação, do comprimento de onda utilizado e da taxa de transmissão. Com o crescente aumento da demanda por taxas de transmissão mais altas, esse tipo de recuperação de sinal ótico tornava-se inviável, pois em geral dependem do comprimento de onda e da taxa de transmissão para que a regeneração pudesse ser efetuada.

Com a descoberta do sistema de amplificação totalmente ótico com o íon da família terra rara Érbio⁺ (MEARS, REEKIE, JAUNCEY, *et al*, 1987; DESURVIRE, SIMPSON e BECKER, 1987), a regeneração de sinais óticos segue por um caminho muito mais interessante, uma vez que a amplificação dos sinais óticos não depende da taxa, formato de modulação e, sua banda de amplificação permite um número muito grande de comprimentos de onda na faixa dos 1550nm, onde a janela de atenuação tem seu nível mais baixo.

Devido a estas características, o EDFA se desenvolveu muito rapidamente, tornando-se uma peça chave nos enlaces óticos atuais, permitindo um grande aumento nas taxas de transmissão e possibilidade de re-configuração dos comprimentos de onda sem a necessidade de substituição do amplificador.

2.1.2 Operação do EDFA

Uma configuração básica de um amplificador a fibra dopada com érbio é mostrada na figura 2.1. Esta configuração é formada por um laser de bombeamento, um acoplador ótico,

isoladores ópticos e a fibra dopada. O bombeamento é feito com um laser operando em um comprimento de onda na faixa de absorção do Érbio, normalmente em 980nm e/ou 1480nm.

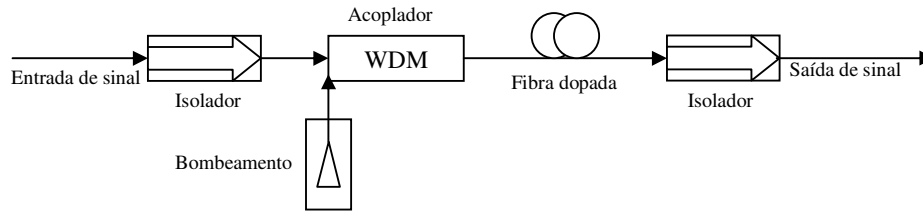


Figura 2.1: Modelo do EDFA (BOTHÁ, 2005).

O laser de bombeamento é inserido na fibra dopada, juntamente com os sinais de entrada, por meio do acoplador óptico. Esse bombeamento excita os íons de Érbio na fibra dopada do nível fundamental (E1) para um nível de energia mais elevado (E3), como mostra a figura 2.2. Esses íons fazem um decaimento não radiativo para um nível de energia mais baixo (para bombeamento com comprimento de onda em 980nm), conhecido como nível metaestável (E2). O tempo de vida dos portadores nesse nível é maior que no nível de bombeamento (E3), da ordem de 10ms, ocorrendo então uma inversão de população (DESURVIRE, 1994).

Uma vez que o sinal transmitido passe pela fibra dopada, o sinal óptico forçará os portadores do nível metaestável a retornar ao seu nível fundamental, através do processo de emissão estimulada. Esse decaimento estimulado é feito de forma radioativa com emissão de luz coerente com o sinal transmitido, com a mesma frequência e fase, em uma banda de comprimentos de onda possíveis que vai de 1525nm a 1565nm.

Por outro lado, emissões espontâneas do nível metaestável também ocorrem, gerando a grande fonte de ruído do EDFA. Este ruído é conhecido como ruído ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) e está presente em toda a banda de amplificação do EDFA.

Este mesmo princípio ocorre quando o bombeamento é feito com laser de 1480nm. Entretanto, neste caso, o sistema é composto de apenas dois níveis de energia (E1 e E2). O bombeamento em 1480nm excita os portadores diretamente para o nível metaestável, sendo o decaimento não radiativo associado a transições entre subníveis do nível metaestável.

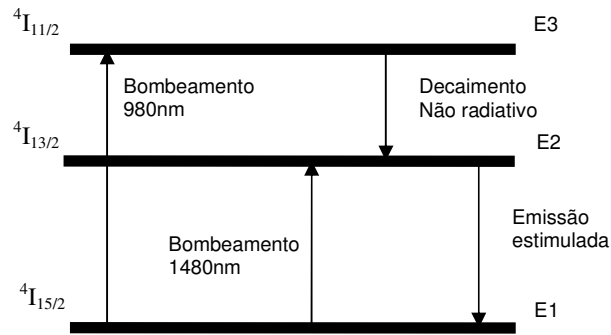
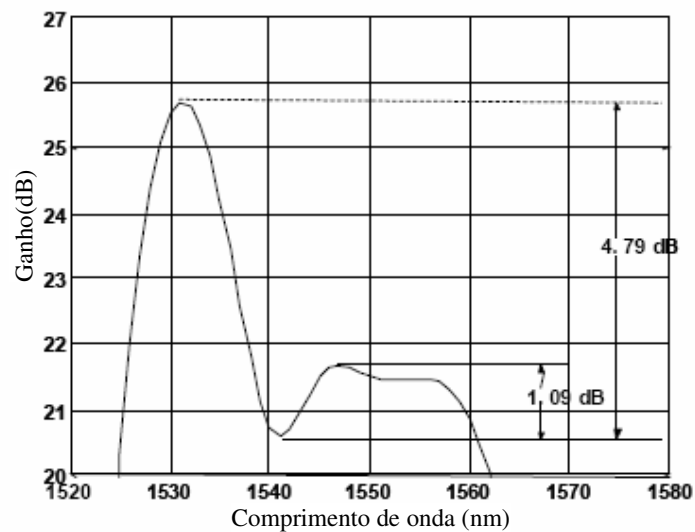


Figura 2.2: Níveis de energia na fibra dopada

2.1.3 Curva de ganho

O ganho de um amplificador ótico a fibra dopada depende de alguns parâmetros chaves que têm grande importância para este trabalho: Ganho dependente do comprimento de onda, ganho dependente da potência do sinal de entrada e ganho dependente da potência do laser de bombeamento.

A dependência do ganho em função do comprimento de onda do sinal de entrada nos leva a uma não linearidade do seu perfil de ganho, isto é, os sinais amplificados não têm a mesma potência de saída. Existe uma banda estreita de alto ganho, com centro em 1532nm, e uma banda mais larga de baixo ganho com centro em 1550nm, como mostra a figura 2.3.



(a)

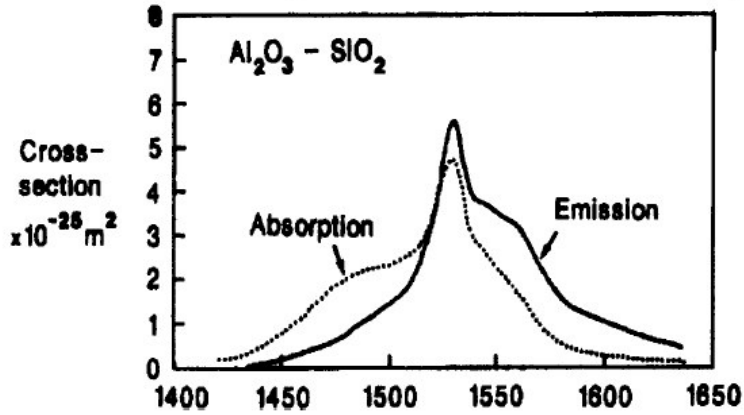


Figura 2.3: (a) Perfil de ganho do EDFA (ZHU, 2001) e; (b) Espectro de absorção e emissão de uma fibra dopada com Érbio (BARNES, LAMING, TARBOX, *et al.*, 1991).

O Ganho do amplificador para cada comprimento de onda pode ser escrito da seguinte maneira (BOTHÁ, 2005):

$$G_{dB}(\lambda) = 4,343(\bar{n}_2\sigma_e(\lambda) - \bar{n}_1\sigma_a(\lambda))\Gamma_s L - Perdas, \quad (1)$$

Onde \bar{n}_1 e \bar{n}_2 : densidade média de portadores no nível fundamental e metaestável respectivamente;

σ_e e σ_a : Seções transversais de emissão e absorção respectivamente;

Γ_s : Fator de sobreposição entre sinal e distribuição de íons de Érbio.

L : Comprimento da fibra;

Perdas intrínsecas na fibra dopada.

Outra característica é que o ganho do amplificador depende da potência de entrada do sinal a ser amplificado. Para pequenos sinais de entrada o ganho do amplificador é maior. À medida que o sinal de entrada aumenta, o ganho do amplificador diminui. Essa região de grandes sinais de entrada é conhecida como região de saturação. Quanto mais saturado o amplificador, menor é a dependência do ganho com os comprimentos de onda de entrada.

O perfil de ganho do EDFA muda com a alteração da potência do laser de bombeamento. A potência dessa fonte óptica está diretamente ligada à quantidade de portadores excitados para níveis de energia mais elevados. Uma vez que a quantidade de portadores diminui, a amplificação é reduzida.

A figura 2.4 exemplifica o resultado da variação na potência ótica de bombeamento, para diferentes potências de sinal de entrada, em um EDFA com bombeamento em 980nm e 16m de fibra dopada, relacionando estas variações com a mudança de ganho do amplificador.

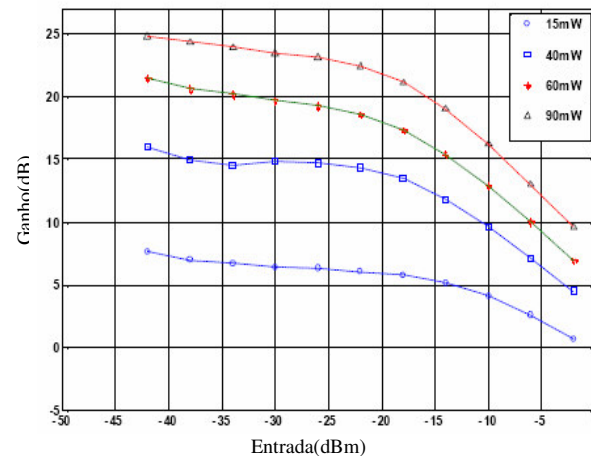


Figura 2.4: Variação do ganho do amplificador, com relação à potência de entrada para quatro potências de bombeamento. (ZHU, 2002)

O perfil de ganho do amplificador também se altera com a mudança de potência do laser de bombeamento, dadas as diferenças entre as razões das regiões de emissão e absorção em função do comprimento de onda. Essas diferenças fazem o ganho variar de forma não uniforme, e os sinais na região próxima a 1530nm (região de maior ganho) experimentarão uma queda muito mais acentuada no ganho do que os sinais na região em torno de 1550nm (região de menor ganho). Essa característica pode ser vista na figura 2.5, para algumas potências de bombeamento.

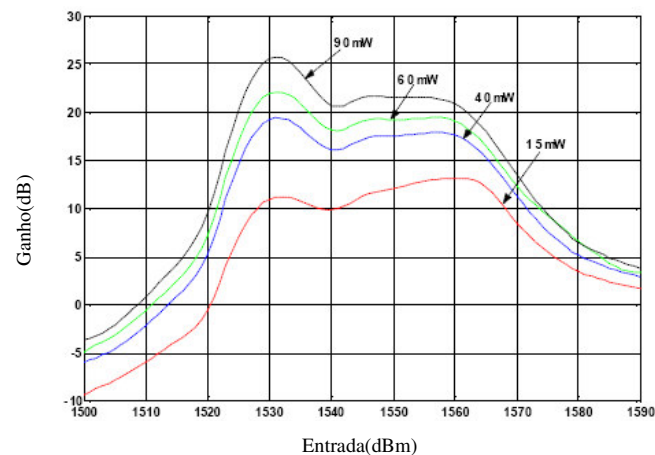


Figura 2.5: Alteração do perfil de ganho para diferentes potências de bombeamento (ZHU, 2002).

2.1.4 Causadores de degradação relacionados ao EDFA

Considerando as características do EDFA previamente citadas, pode-se verificar os pontos de influência relacionados à degradação do sinal ótico em uma rede.

Em enlaces óticos longos, com vários estágios de amplificação, o fato do ganho do EDFA ser dependente do comprimento de onda representa um fator de risco de degradação do sinal. O desnível de potências óticas dos canais se acumula ao longo do percurso, induzindo a um fator de degradação conhecido como *crosstalk* linear.

O *crosstalk* linear surge no enlace devido aos filtros utilizados. Esses filtros acabam inserindo ruídos no enlace por deixarem passar parte da potência ótica de canais para seus adjacentes. Por exemplo, se o canal 2 de um enlace WDM tem uma potência muito elevada, parte dessa potência será inserida nos canais 1 e 3 na forma de ruído. Se o *crosstalk* gerado for muito forte, um bit 0 transmitido pode ser considerado como bit 1 no receptor. Esse ruído degrada a relação sinal ruído ótico.

Com o acúmulo dos desníveis de potência ao longo do enlace, o *crosstalk* gerado, principalmente no filtro de entrada do receptor, pode atingir grandes proporções. Um canal com potência muito alta pode ter parte de sua potência transferida para um canal adjacente no filtro. Essa potência transferida acaba degradando o canal.

A figura 2.6 mostra uma simulação realizada com o auxílio do software *VPI TransmissioMaker*[®] da *VPI Photonics*. Essa simulação apresenta quantitativamente as potências inseridas em canais adjacentes, para um demultiplexador ótico baseado em parâmetros de um dispositivo comercial. A perda de inserção do demultiplexador é de 3,5dB e a isolação entre os canais é de 50dB. Os lasers não estão modulados e o espaçamento é de 200GHz, utilizando os mesmos canais apresentados na tabela 4.2. Pode-se perceber um grande acúmulo de ruído no canal sete, aproximando-se de -20dBm.

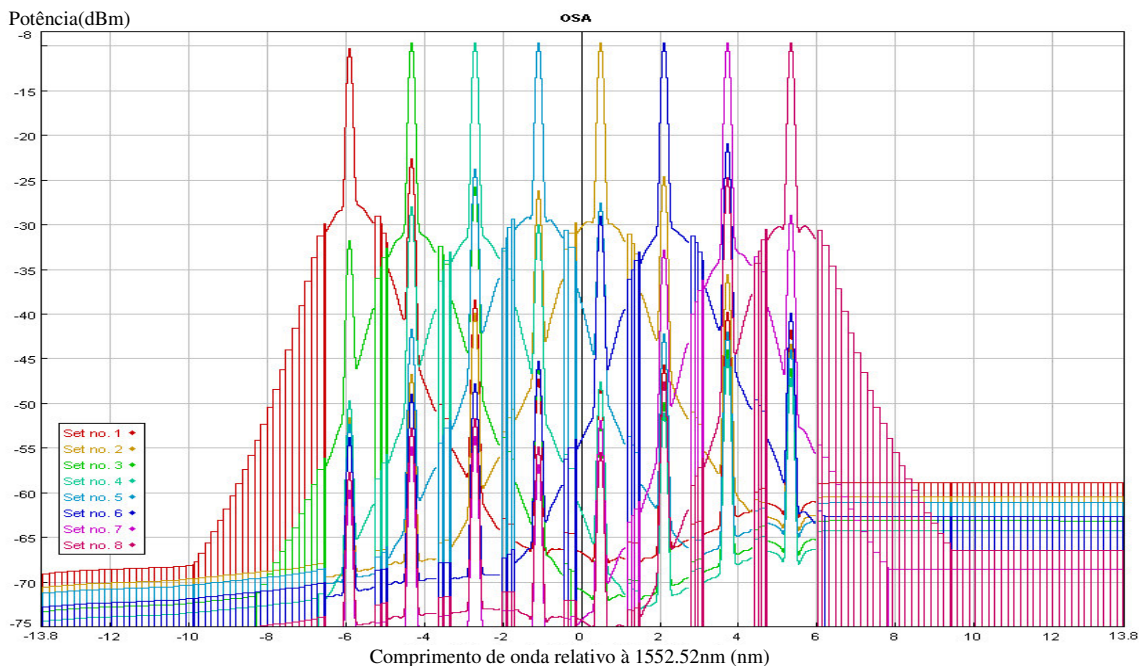


Figura 2.6: Contribuição do *crosstalk* nos canais.

Esse tipo de ruído aparece mesmo em redes óticas estáticas, e é ainda mais perceptível em redes dinâmicas, com o aumento da quantidade de dispositivos como os filtros (Multiplexadores, Demultiplexadores, Acopladores, *Cross Connects* e etc.).

Outro fator de degradação são as não linearidades que podem surgir nas fibras e são dependentes da potência ótica total inserida (CHRAPLYVY, 1990; AGRAWAL e BOYD, 1992). Das não linearidades conhecidas, podemos citar o Espalhamento Raman Estimulado (SRS – *Stimulated Raman Scattering*), o Espalhamento Brillouin Estimulado (SBS – *Stimulated Brillouin Scattering*) e a Mistura de Quatro Ondas (FWM – *Four-Wave Mixing*).

Estas não linearidades restringem o uso de alta potência ótica total nas fibras, ou, de outro ponto de vista, restringem a potência ótica máxima por canal inserido na fibra.

O SRS aparece como uma interação entre uma frequência ótica e a vibração das moléculas de sílica que constituem as fibras, essa interação faz parte da potência ótica do sinal ser transferida para uma frequência mais baixa, na direção co-propagante ou contra-propagante, reduzindo a potência da portadora inicial.

O Espalhamento Raman limita a potência ótica por canal que pode ser aplicada à fibra, e pode chegar a absorver 50% da potência do canal. O ruído é gerado pela sobreposição do comprimento de onda gerado pelo espalhamento e um canal de transmissão, e depende do espaçamento entre canais.

A banda de ganho Raman é da ordem de 13THz (CHRAPLYVY,1990; AGRAWAL e BOYD, 2001), o limite de potência por canal diminui na proporção de $1 / N$, onde N é o número de canais. À medida que o número de canais aumenta, aumentam também as interações entre eles e o limite de potência dos canais passa a cair na proporção de $1 / N^2$, como mostra a figura 2.7a.

Essa não linearidade conhecida das fibras óticas é aplicada aos amplificadores óticos Raman.

O SBS aparece de interações do sinal ótico com ondas acústicas na rede cristalina da sílica. Parte da potência ótica é convertida em uma nova onda, de frequência mais baixa, no sentido contra-propagante. Essa não linearidade esgota o sinal e gera um forte sinal ótico de volta para o laser transmissor. O sinal ótico espalhado é de uma frequência mais baixa do que a frequência do sinal gerador, por uma diferença calculada por $f_B = 2nV_s / \lambda$, onde n é o índice de refração da fibra e V_s é a velocidade do som na fibra (CHRAPLYVY,1990).

O espalhamento Brillouin limita a potência máxima por canal na fibra, mas essa potência não sofre alteração com o número de canais (figura 2.7a). O SBS tem banda estreita, entre 20MHz e 100MHz (CHRAPLYVY,1990), aproximadamente, devido ao tempo de vida dos portadores acústicos (*phonons*) que é muito alto.

Em redes dinâmicas, onde existe roteamento de comprimentos de onda, e dispositivos conhecidos como *CrossConnects* Óticos e Módulos de inserção e derivação óticos (OADM) os efeitos não lineares podem ser acentuados. A inserção de um canal com potência ótica maior do que os canais que passam pelo enlace pode gerar o SBS, que domina a interação das não linearidades para uma quantidade pequena de canais.

O SBS também pode surgir devido à característica dinâmica do ganho do EDFA, que é dependente da potência de entrada total do amplificador. Com a variação da potência de entrada, o ganho do EDFA muda, resultando em uma variação na potência de todos os canais presentes, até que o sistema retorne ao equilíbrio. Até o equilíbrio, o EDFA apresenta variações rápidas em seu ganho. Estes fenômenos são conhecidos como transientes, e são responsáveis por gerar erros no receptor. O SBS pode surgir se o sistema estiver operando no limite de potência total na fibra.

Por fim, o FWM resulta da interação de dois sinais óticos co-propagantes que se misturam formando dois novos sinais óticos, como bandas laterais, em $2f_1 - f_2$ e $2f_2 - f_1$, onde f_1 e f_2 são os sinais envolvidos na interação. Isso pode ser visto na figura 2.7b.

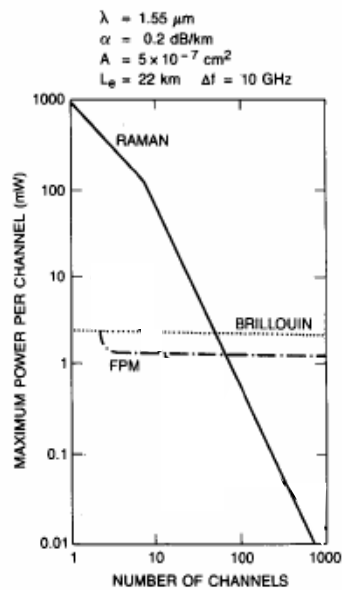
Essa não linearidade depende fortemente da característica de dispersão da fibra e do espaçamento entre os canais. Devido à característica de dispersão cromática da fibra, os feixes

gerados e os geradores têm diferentes velocidades de grupo. Isso reduz a conservação de fase entre os sinais geradores/gerados, reduzindo a eficiência do efeito.

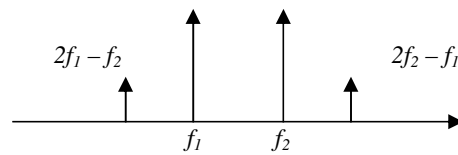
Esses sinais podem se sobrepor a outros comprimentos de onda presentes na fibra e esta característica de degradação aumenta à medida que a separação entre canais diminui.

O FWM é a não linearidade que mais restringe a potência ótica por canal inserido na fibra em sistemas WDM.

O SRS torna-se dominante para uma grande quantidade de canais, Essa não linearidade pode ter influência ainda maior que o FWM em sistemas com espaçamento pequeno, mas com elevado número de canais (aproximadamente 100 canais com 1mW de potência), como pode ser observado na figura 2.7.



(a)



(b)

Figura 2.7: (a) Máxima potência por canal em relação à quantidade de canais, para o SRS, SBS e FWM e; (b) formação do FWM (CHRAPLYVY, 1990).

O resultado desta variação transiente nas potências óticas dos canais presentes no enlace é a geração de erros no momento da inserção ou retirada de um ou mais canais, que ocorrem em curtos períodos de tempo (*bursts* de erro).

A figura 2.8 mostra a variação de ganho do EDFA para 50% dos canais retirados de uma rede com 50 estágios de amplificação (PAVEL, 2003). Percebe-se que os transientes tornam-se mais elevados e com maior frequência à medida que passam pelos estágios de amplificação, pois seu efeito se acumula. Para altas taxas de transmissão isso pode significar um *burst* de erro no receptor. Essa resposta dinâmica do EDFA pode gerar não linearidades na fibra, como já foi dito anteriormente. Esse fenômeno tende a ocorrer sempre que existe uma alteração brusca de potência no enlace, advindo dos controles óticos ativos como OXCs e OADMs.

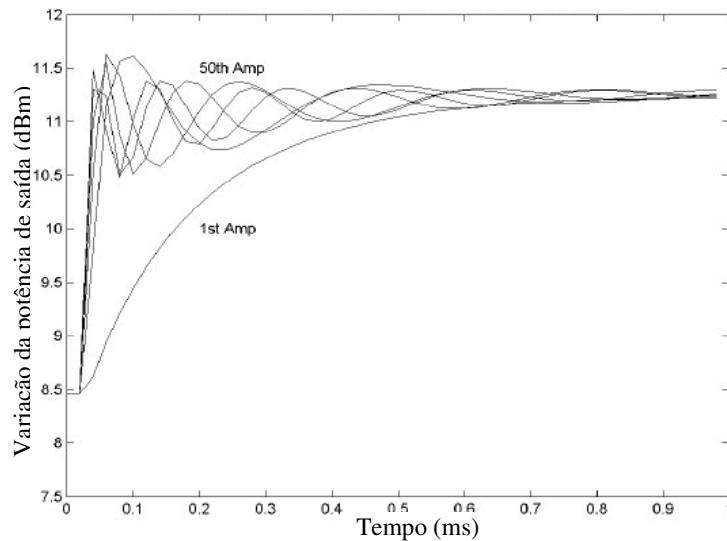


Figura 2.8: Transientes de ganho do EDFA, após 1 e 50 estágios de amplificação. (PAVEL, 2003)

CAPÍTULO 3

TÉCNICAS DE EQUALIZAÇÃO

3.1 METODOS DE EQUALIZAÇÃO

Com o intuito de minimizar os efeitos da não equalização de potências em redes óticas, diversos estudos têm sido realizados (CHEN, VISIONE, PAVLIK *et al.*, 2002; SUZUKI, KITO, SUZUKI, *et al.*, 2002; SHTAIF, MECOZZI e TKACH, 2002; ARIE, 2002; JIN-XING, KAI-MING, XIAOPENG, *et al.*, 1997; FEI, ZHENG, ZHANG, *et al.*, 1999), analisando as melhorias conseguidas com a equalização.

Neste capítulo são apresentados alguns modelos mais tradicionais de equalizadores de potência ótica e controladores de ganho e suas características.

3.1.1 Método da Pré-Ênfase

Esse método simples é utilizado basicamente nas redes óticas estáticas. A técnica consiste em calcular o desnível de potências no fim do enlace (recepção) e aplicar uma amplificação / atenuação aos canais no início da rede (transmissor).

Esse modelo oferece como vantagem a simplicidade de implementação, que pode ser atingida com o auxílio de controle de potência dos canais de transmissão. Entretanto, será eficaz apenas para reduzir problemas de *crosstalk* nos filtros de recepção, uma vez que durante a maior parte do percurso ótico as potências dos canais continuam desiguais (MENIF, RUSCH e KARÁZEK, 2001).

Essa técnica não poderia ser aplicado a redes dinâmicas, pois as variações de potência são maiores, devido aos roteamentos de comprimentos de onda.

A figura 3.1 exemplifica o modelo. Os canais deixam o transmissor com potências diferentes, calculadas para atingir o receptor com diferença mínima.

A existência de filtros multiplexadores ou demultiplexadores ao longo do enlace pode acarretar na inserção de *crossstalk* linear, uma vez que a equalização propriamente dita ocorre apenas na recepção.

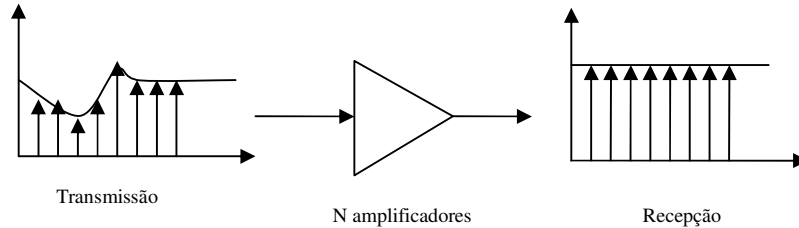


Figura 3.1: Método da Pré-Ênfase

Esse método tem como grande desvantagem o fato de que, uma vez alterada a rede, a pré-ênfase deve ser alterada também. Além disso, para uma grande quantidade de enlaces, alguns canais deveriam ter uma potência muito baixa no transmissor, para compensar o acúmulo de potência que se dá ao longo da rede.

3.1.2 Método da planificação do Ganho

Esse modelo de equalização oferece grandes vantagens em comparação ao método anterior. Consiste em eliminar a dependência do ganho do EDFA com relação aos comprimentos de onda.

Como verificado no capítulo anterior, o EDFA apresenta uma banda estreita de alto ganho centrada em 1532nm e uma segunda banda, mais larga, de ganho aproximadamente linear centrada em 1550nm (Figura 2.3). Essa desigualdade elimina a possibilidade de usar toda a banda de amplificação do EDFA em redes DWDM.

A técnica de planificação de ganho consiste em utilizar um dispositivo externo ao EDFA, de forma a eliminar as diferenças de ganho (ROCHETTE, GUY, LAROCHELLE, *et al.*, 1999). Para tanto, podem ser usados dispositivos como atenuadores, grades de período longo (LPG - *Long-Period Grating*) ou ainda as grades de Bragg com gorjeio em fibra (CFBG - *Chirped Fiber Bragg Grating*). Esses filtros oferecem vantagem por não ser necessária a separação dos canais, via demultiplexadores óticos.

A figura 3.2 mostra o resultado da utilização de um dispositivo CFBG para equalização de ganho do EDFA (ROCHETTE, GUY, LaROCHELLE, *et al.*, 1999). Essa

CFBG é conhecida como Filtro de Planificação de ganho (GFF - *Gain Flattening Filter*). Existe uma perda de ganho do EDFA como resultado da planificação.

A CFBG é construída de forma a apresentar uma característica de transmissão exatamente oposta à curva de ganho do EDFA. Assim, a sua saída será praticamente independente do comprimento de onda.

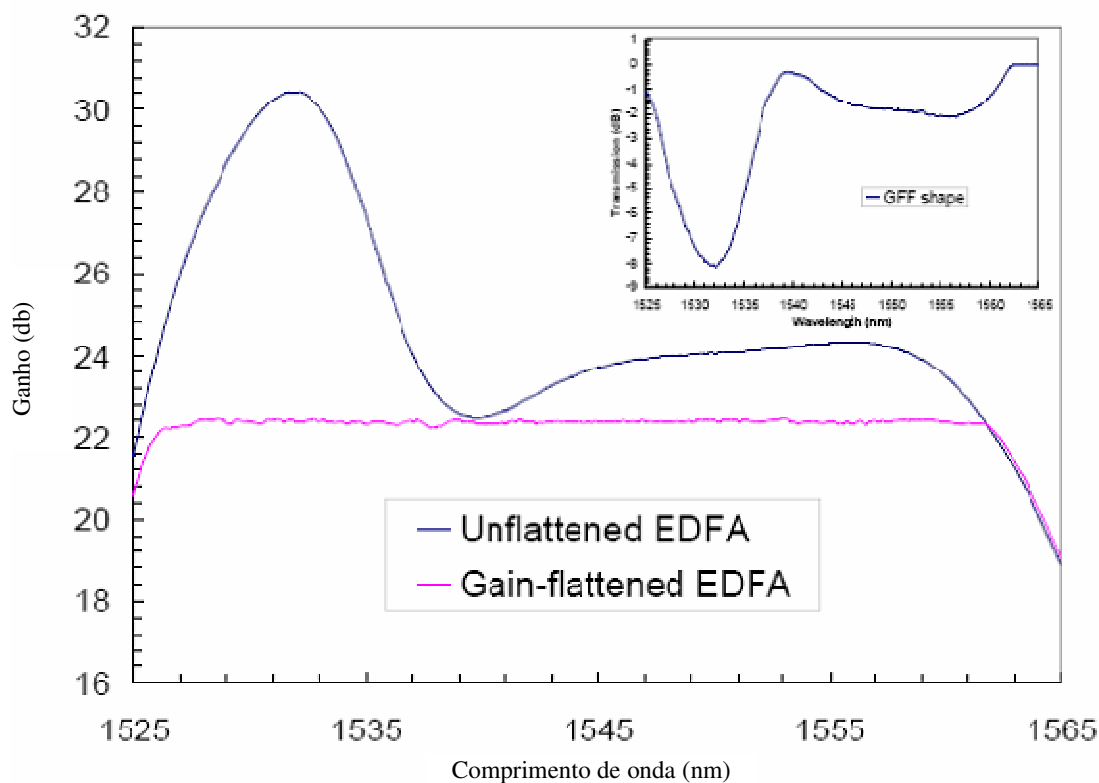


Figura 3.2: Planificação do ganho do EDFA utilizando CFBG (ROCHETTE, GUY, LaROCHELLE, *et al*, 1999) .

Esse filtro pode ser aplicado em todos os amplificadores de linha, garantindo assim a equalização das potências em todo o enlace, com isso o *crosstalk* linear é reduzido e o OSNR na recepção melhora. Por outro lado, estudos mostram que a eficiência do método é reduzida quando os transientes de ganho do EDFA são considerados (BAKHSHI, VAA, GOLOVCHENCO, *et al*, 2001).

Em uma rede dinâmica, com canais sendo adicionados e retirados ao longo do enlace, acabam ocorrendo variações na potência total de entrada dos EDFAs. Uma vez que o ganho do amplificador tem dependência com a potência de entrada, serão observadas variações na curva de ganho. Por sua vez, os filtros utilizados para planificação normalmente são fixos e

não acompanham a variação. Na Figura 3.3 pode-se observar o efeito causado pela retirada de um canal em uma rede DWDM com espaçamento de 50GHz, 64 canais a 12,3 Gbps, operando com GFFs para planificação do ganho do EDFA, possibilitando o uso de 28nm de banda em um enlace de 6050 km.

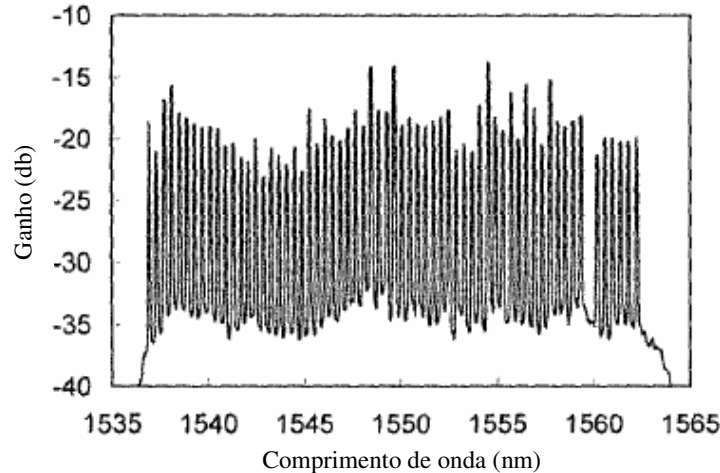


Figura 3.3: *Tilt* de potências quando o canal 58 é retirado (BAKHSHI, VAA, GOLOVCHENKO,*et. al.*, 2001) .

3.1.3 Método de Equalização Utilizando Atenuadores Óticos

Os atenuadores óticos variáveis (VOA – *Variable Optical Attenuator*) são dispositivos bastante conhecidos e utilizados em redes óticas. Estes dispositivos atenuadores permitem que o nível de atenuação possa ser alterado de acordo com a necessidade, mecanicamente, via parafusos de sintonia, ou através de corrente elétrica, que permite alteração dinâmica das potências. O dispositivo pode ser observado na figura 3.4.

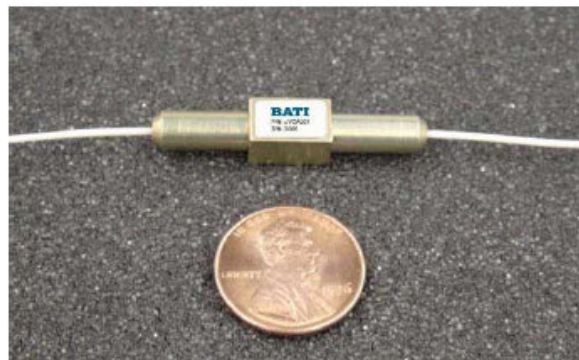


Figura 3.4: Micro VOA da *Boston Applied Technologies* (BOSTON APPLIED TECHNOLOGIES).

Os VOAs sugerem a possibilidade de fabricação de equalizadores dinâmicos, uma vez utilizados atenuadores controlados por corrente elétrica. Esses dispositivos são capazes de atingir atenuações de 40dB, com baixa perda de inserção e tempos de resposta reduzidos, em torno de 5ms.

Outros dispositivos, tais como filtros acusto-óticos e filtros a cristal líquido, podem ser utilizados com o mesmo modelo de equalização (WILLNER, HUANG, ZOU, *et al.*, 1996), entretanto o sistema de controle destes filtros é um pouco mais complexo, requerendo controles eletrônicos especializados para geração de sinais senoidais de alta frequência, o que torna o VOA mais adequado para esse esquema de equalização.

A técnica de equalização utilizando VOAs consiste em aplicar uma atenuação ao canal de acordo com a potência do mesmo ou dos demais canais do enlace. Pode operar estaticamente, da mesma forma que o modelo descrito no capítulo 2, aplicando atenuações de forma a planificar o perfil de ganho do amplificador. Entretanto, o formato mais interessante é usar um algoritmo dinâmico de controle, assim as atenuações podem ser alteradas de acordo com as potências óticas dos canais.

O modelo utilizado tem o formato apresentado na Figura 3.5. Essa figura mostra um equalizador para 8 canais WDM, composto por um *array* de VOAs, que fazem parte da realimentação do sistema, um *array* de fotodetetores, com finalidade de medir as potências óticas em cada canal separadamente, e um bloco de controle, que utiliza o valor da potência medida pelos fotodetetores, calcula a atenuação necessária em cada VOA e aplica o valor de atenuação. Com a variação das potências dos canais na entrada, o bloco de controle recalcula as atenuações, mantendo os canais de saída sempre com potências muito próximas.

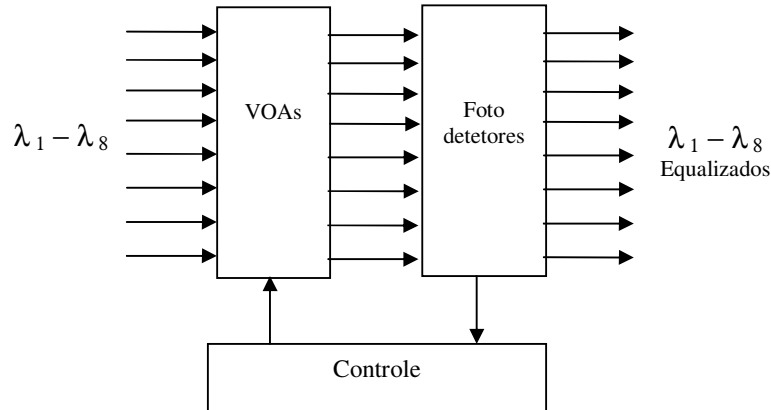


Figura 3.5: Modelo de equalização dinâmica utilizando VOAs

A vantagem deste modelo é que permite atuação forçada e independente em cada canal, por exemplo, o controle pode ser configurado para excluir um canal (atenuação máxima), forçar uma atenuação específica ou mesmo excluir um determinado canal da equalização, atuando somente nos demais.

A principal desvantagem é a necessidade de separação dos canais através de demultiplexadores e reagrupamento via multiplexadores. Esses filtros normalmente possuem uma perda por inserção elevada, da ordem de 3,5dB. Além disso, fica claro que a quantidade de canais é limitada, devido à quantidade de dispositivos independentes que devem ser utilizados. Para um enlace de 40 canais, por exemplo, seriam necessários 40 VOAs e 40 fotodetetores, somando-se a isso a complexidade do bloco de controle que aumenta consideravelmente.

Este modelo foi o escolhido para implementação e será discutido com maiores detalhes no Capítulo 4 – Equalizador Dinâmico de Potências Óticas.

3.2 TRANSIENTES DE GANHO

Fenômenos dinâmicos ligados à característica de operação e construção dos amplificadores óticos à fibra dopada, conhecidos como transientes de ganho, são grandes causadores de distúrbios nos sistemas óticos. Estes fenômenos dinâmicos são oscilações do ganho do EDFA que ocorrem quando há variação na potência total de entrada. Para pequenos sinais de entrada no EDFA o ganho é praticamente constante. Quando os sinais de entrada

aumentam, o ganho do EDFA sofre uma redução, devido ao efeito da saturação. Essas variações ocorrem basicamente devido a dinâmica de geração e utilização de íons excitados. O Processo de geração de íons excitados depende principalmente do bombeamento e a utilização dos íons excitados está ligado às emissões estimuladas causadas pelo sinal de entrada.

Para supressão de transientes de ganho, basicamente duas técnicas são utilizadas e têm sido demonstradas com eficácia (PAVEL, 2002 e 2003; CHUNG, KIM e CHAE, 1996; YU e O'MAHONY, 1997). A primeira é uma técnica totalmente ótica de supressão, a outra utiliza controle de laser de bombeamento para atuar dinamicamente no amplificador ótico. Essas técnicas são usadas com o intuito de manter o ganho do amplificador ótico praticamente invariável com as alterações da potência total de entrada.

3.2.1 Supressão Totalmente Ótica

Uma vez que o EDFA tem seu ganho dependente da potência de entrada total, é possível utilizar um sinal ótico de controle, de forma a anular as diferenças de potência de entrada no amplificador.

Isso pode ser feito (CHUNG, KIM e CHAE, 1996), fazendo uma realimentação na entrada. A figura 3.6, mostra o esquema de supressão.

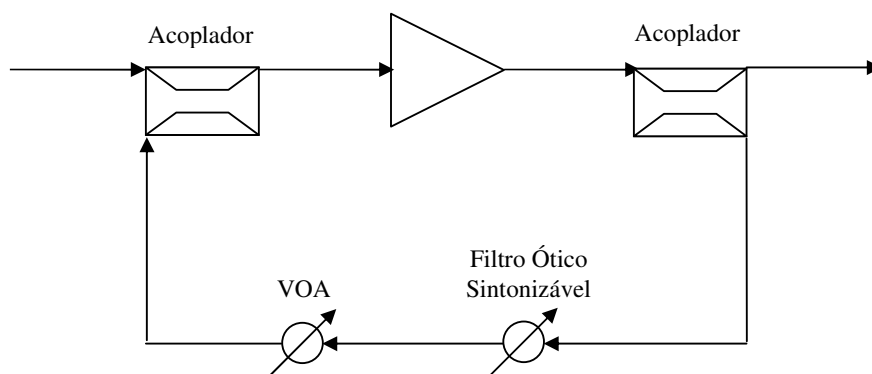


Figura 3.6: Realimentação ótica para supressão de transientes (CHUNG, KIM e CHAE, 1996).

Uma vez que o canal de controle realimenta o amplificador, ele também estará concorrendo com os sinais de entrada pelo ganho. Ajustando o atenuador para que o canal de controle se torne dominante e, como o amplificador opera em regime de saturação, este canal passa a absorver as oscilações de entrada e os demais canais se mantem praticamente invariáveis. A sintonia do canal de controle é feita por intermédio do filtro ótico sintonizável.

Em saturação, o EDFA tem seu perfil de ganho com menor desnível de potências. Com esse modelo então, os transientes oriundos do EDFA diminuem e o ganho é planificado. Entretanto existem desvantagens nesse modelo devido a fenômenos que ocorrem no EDFA, conhecidos como oscilações de relaxação e o *Spectral Hole Burning* (SHB) (LUO, ZYSKIND, SUN, *et al*, 1997). As oscilações de relaxação aparecem devido ao fato que os mecanismos de controle não operam instantaneamente no sistema, provocando oscilações amortecidas na potência ótica dos canais. O *Spectral Hole Burning* é responsável pelo ganho não retornar exatamente ao ponto de operação após a retirada ou inserção de um canal. Esse fenômeno surge como uma depressão no perfil de ganho do amplificador quando um sinal de alta potência reduz a população média de íons de Érbio (METHA, 2003).

Dependendo do comprimento de onda utilizado no controle, as duas características variam (LUO, ZYSKIND, SUN, *et al*, 1997). Quanto mais o comprimento de onda se aproxima dos comprimentos de onda dos canais transmitidos, mais pronunciado é o fenômeno das oscilações de relaxação e menor é o SHB. Por outro lado, à medida que o canal de controle se afasta dos canais transmitidos, o SHB aumenta e as oscilações de relaxação diminuem. Dessa forma, torna-se impossível escolher um comprimento de onda que elimine os dois efeitos simultaneamente. Esses dois fenômenos ocorrem devido à características intrínsecas do Érbio, como tempo de resposta, e não podem ser completamente eliminadas.

As figuras 3.7(a), 3.7(b) e 3.7(c) demonstram esses efeitos para diferentes comprimentos de onda de controle (1532nm, 1540nm e 1555nm, respectivamente). Percebe-se que à medida que um efeito diminui o outro aumenta, conforme mencionado (LUO, ZYSKIND, SUN, *et al*, 1997).

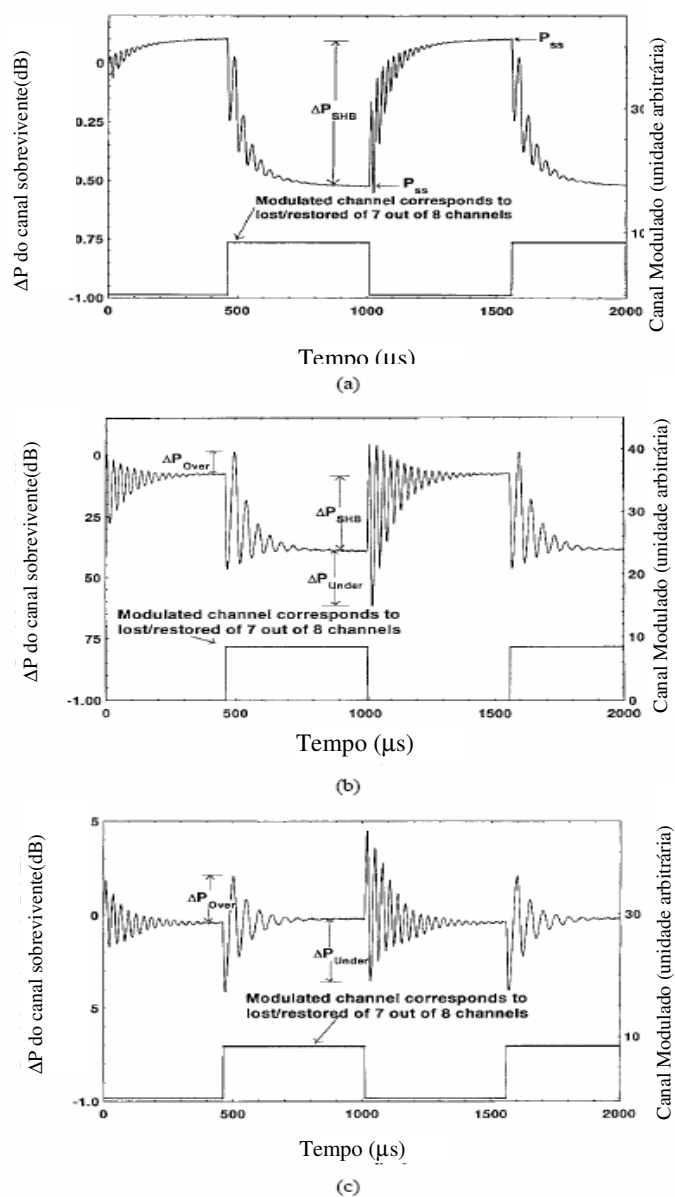


Figura 3.7: Oscilações de relaxação e SHB. (a) grande SHB; (b) SHB reduzido e oscilação de relaxação aumentada e; (c) Grande oscilação de relaxação. Canal sobrevivente em 1552.3nm (METHA, 2003).

3.2.2 Controle Automático de Bombeamento

Diferente do modelo apresentado na seção 3.2.1, essa técnica utiliza um controle eletrônico, agindo diretamente no laser de bombeamento, de forma a corrigir as variações do ganho com a alteração da potência total de entrada do amplificador.

Como visto no Capítulo 2, a potência do laser de bombeamento tem influência direta sobre o ganho e perfil do EDFA (Figuras 2.4 e 2.5). Controlando dinamicamente a corrente de polarização do laser, e conseqüentemente a potência, pode-se variar o ganho conforme a necessidade. É necessário utilizar um fotodetector na entrada do EDFA para medir a variação de potência total e com isso calcular a alteração na polarização do laser de bombeamento. Esse controle deverá corrigir a oscilação de ganho do EDFA.

Na figura 3.8 temos um diagrama simplificado, exemplificando o uso da técnica para um tipo de controle conhecido como alimentação adiante (*feedforward*).

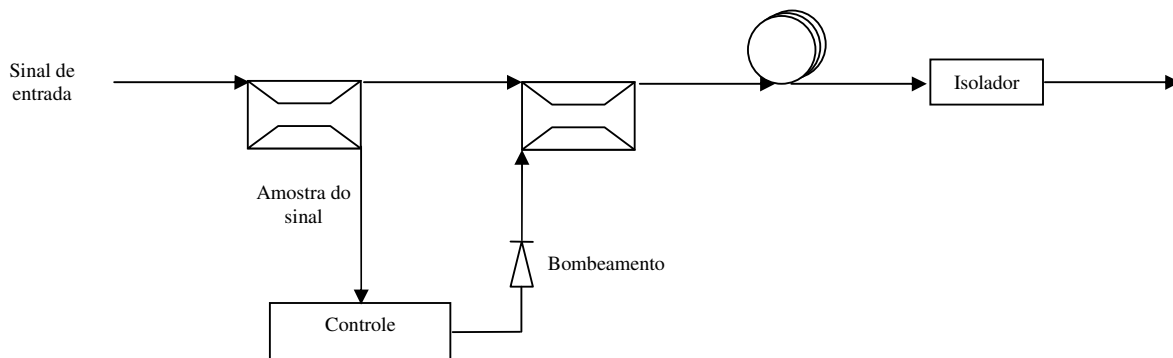


Figura 3.8: Modelo de controle automático de ganho eletrônico (BOTHA, 2005).

A vantagem deste método é a simplicidade. O controle deve ser feito muito rapidamente, seu tempo de resposta deve ser de poucos microssegundos, para que seja possível corrigir satisfatoriamente as flutuações de ganho. O modelo da figura 3.8 não permite a correção de ganho do EDFA quando este varia devido a fatores externos, que não a variação de potência de entrada, como por exemplo, variações de temperatura ambiente. Para corrigir esse fator é necessária uma técnica de realimentação (*feedback*). Essa realimentação mede a saída do EDFA e verifica se a correção via bombeamento foi bem sucedida, caso contrário é feito um ajuste fino na corrente de polarização, mantendo o valor do ganho estável, independente das variações de potência de entrada.

A variação do ganho do amplificador pode ser verificada na figura 3.9, para um sistema com controle automático de ganho simulado com o *VPI TransmissionMaker*[®]. A

simulação utiliza 4 canais WDM, com taxa de 10Gbps, inseridos em um amplificador ótico a fibra dopada com érbio com controle eletrônico de laser de bombeamento (980nm). O Bombeamento inicia em 25mW. Após 5 iterações da simulação, o canal 1 é cortado.

Verifica-se a flutuação da potência ótica do bombeamento, no momento em que um canal (entre quatro canais com 0dBm) é retirado. Essa simulação utiliza controle de laser de bombeamento apenas com realimentação (somente a potência ótica de saída é monitorada). Uma parte do sinal ótico total na saída do EDFA é utilizada como amostra para que o controle calcule a alteração que deve ser feita no bombeamento de forma a fazer o ganho retornar ao seu estado anterior. É perceptível uma leve variação no ganho do EDFA no momento em que ocorre a mudança de bombeamento.

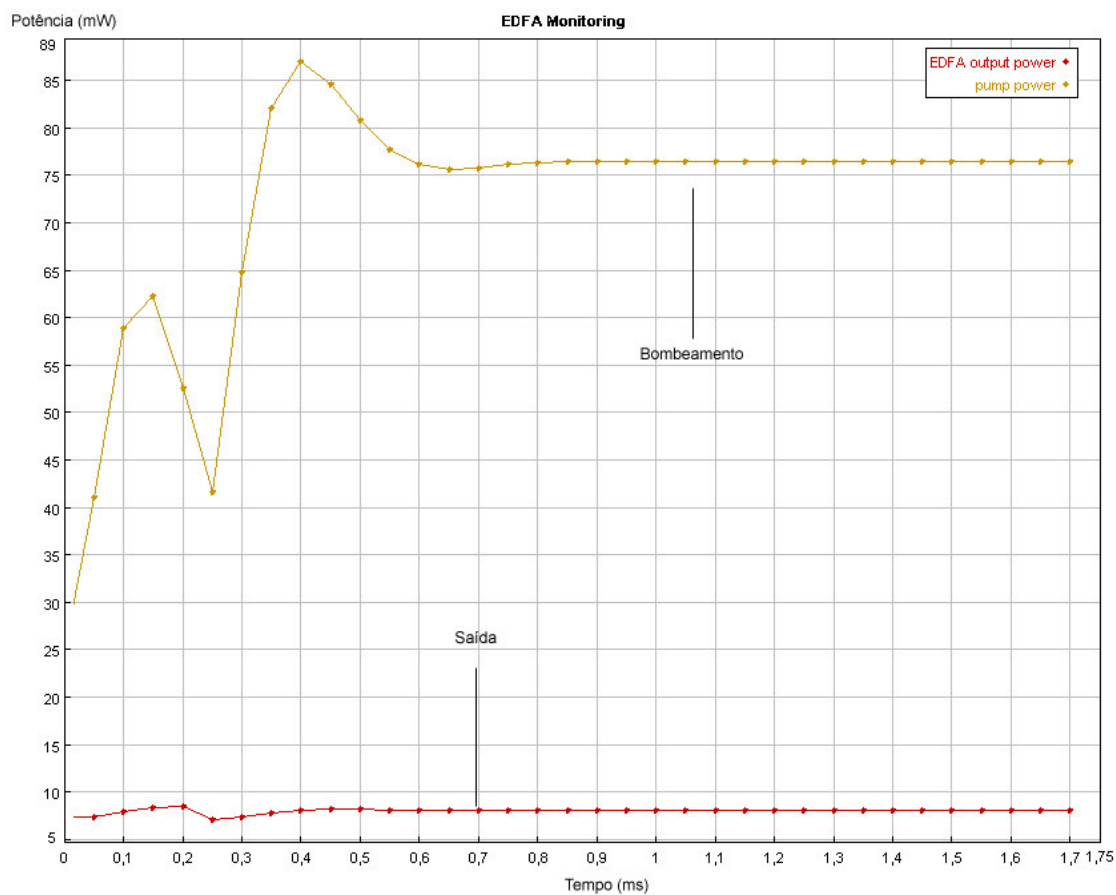


Figura 3.9: Controle de Bombeamento Simulado, 1 de 4 canais é retirado.

A oscilação percebida na potência do laser de bombeamento deve-se ao tipo de controle utilizado para calcular a nova corrente de polarização do laser. O tempo de resposta médio é de aproximadamente 400 μ s. Esse controle não é perfeito, uma vez que nota-se uma

pequena diferença entre a potência total antes e depois da retirada do canal. As imperfeições do controle se devem às características dos componentes eletrônicos utilizados, configurados com parâmetros reais, de forma a tornar a simulação mais real.

A desvantagem da técnica é que ainda é necessária a equalização dos canais, pois o perfil de ganho do amplificador é alterado a cada mudança de potência do laser de bombeamento. Como já foi visto, se o amplificador operar sempre saturado, o perfil permanece praticamente plano, entretanto isso não acontece quando muitos canais são retirados. A potência de bombeamento muda bastante e o perfil tende a ter grandes desníveis de potência, como pode ser visto na figura 2.5, no capítulo 2. Isso faz necessária a inserção de um dispositivo de equalização para eliminar as desigualdades de potência ótica na saída.

Além das duas técnicas apresentadas existe ainda um modelo que utiliza uma estrutura híbrida de controle, misturando a técnica ótica e a eletrônica. Permanecem as características limitantes do desempenho da técnica de controle totalmente ótico, como oscilações de relaxação, porém, essas oscilações são drasticamente reduzidas com o uso de um controle eletrônico de resposta rápida, que reduz o tempo de equilíbrio das potências.

Apesar do melhor desempenho da técnica eletrônica comparado à técnica totalmente ótica, o modelo eletrônico não é muito utilizado, pois a complexidade existente para construir um circuito de controle suficientemente rápido é elevada. Mesmo em laboratório essa técnica é difícil de ser implementada, o que explica a pequena quantidade de artigos encontrados na literatura que abordam o assunto.

A tabela 3.1 mostra um comparativo entre as técnicas de equalização e controle de ganho apresentadas.

Tabela 3.1: Quadro comparativo entre os métodos de equalização e controle de ganho.

Tipo	Técnica	Vantagens	Desvantagens
Equalização Espectral	Pré-ênfase	Fácil implementação.	Funcionamento eficiente em redes estáticas com poucos amplificadores de linha;
Equalização Espectral	GFF	Fácil implementação; Planifica o ganho do EDFA; Pode ser usada em cada estágio de amplificação; Não é preciso separação de canais.	Pode gerar desigualdades de potência devido a variações de ganho; Não reduz transientes de ganho.
Equalização Espectral	VOA	Controle independente de cada canal; Pode fazer a planificação do ganho do EDFA e se ajustar a variações de ganho.	Necessita separação dos canais, aumentando a perda de inserção devido aos filtros necessários. Não reduz transientes de ganho.
Equalização Temporal	Controle de potência totalmente ótico	Mantém o ganho do EDFA independente da potência total de entrada;	Inserir fenômenos como SHB e oscilações de relaxação. Não equaliza as potências dos canais.
Equalização Temporal	Controle de potência eletrônico	Mantém o ganho do EDFA independente da potência total de entrada;	Não equaliza as potências dos canais.

CAPÍTULO 4

EQUALIZADOR DINÂMICO DE POTÊNCIAS ÓTICAS

4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo mostra o desenvolvimento de um equalizador dinâmico de potências óticas. Inicia-se abordando o modelo adotado e explicando o seu funcionamento esperado. Segue-se então as considerações sobre escolha de componentes óticos e eletrônicos necessários para a implementação do sistema em laboratório.

Neste capítulo também são apresentadas as simulações feitas com o modelo, com auxílio de um software matemático. As simulações efetuadas aparecem depois da escolha dos componentes óticos para que a simulação pudesse ser executada com valores reais, fornecidos pelos fabricantes dos componentes, deixando-as o mais próximo possível do real.

Ao final do capítulo, tem-se o sistema físico propriamente dito, tomando a forma de um equipamento a ser aplicado em enlaces óticos. Todo o desenvolvimento e metodologia são descritos aqui de forma detalhada.

4.2 MODELO DE EQUALIZAÇÃO

No capítulo 3 foram apresentados alguns dos modelos de equalização mais utilizados e que mais são encontrados na literatura. Cada modelo apresenta vantagens e desvantagens sobre os demais. Para que os objetivos propostos neste trabalho fossem alcançados, optou-se por escolher o método descrito na seção 3.1.3, que utiliza VOA's para o controle de potência individual de cada canal. É fato que, para elevadas quantidades de canais, o modelo deixa de ser tão atraente. Por outro lado, ele permite usar diversas características interessantes que não poderiam ser alcançadas com os demais modelos. Estas características envolvem leitura e controle de potência por canal, atenuação forçada de canal e até mesmo corte de canal, aplicando atenuação máxima (40dB).

Como visto na seção 3.1.3, o modelo poderia ser feito com outros tipos de componentes óticos que não os VOA's. A grande vantagem destes sobre os outros é que são dispositivos largamente utilizados e conhecidos, de custo relativamente baixo (da ordem de

US\$400 por canal) e principalmente, de fácil controle eletrônico, o que torna o sistema de controle de atenuação facilitado e de implementação mais ágil.

Com a opção por uso de VOA's, surge um novo fato a ser atentado: A tecnologia de fabricação do atenuador que melhor atende a necessidade do projeto.

Para a escolha da tecnologia de atenuação que melhor se aplica ao projeto foram considerados os seguintes pontos: Perda de inserção reduzida, baixo tempo de resposta, alta capacidade de atenuação, controle de atenuação via tensão contínua, independência do comprimento de onda e baixo custo. A tecnologia escolhida que melhor atende as características sistemas é o MEMS (*Micro-Eleto-Mechanical Systems*), descrito em maiores detalhes na seção 4.3.

A figura 4.1, apresenta novamente o modelo equalizador usando VOA, desta vez mais detalhado, já considerando os aspectos de projeto e componentes.

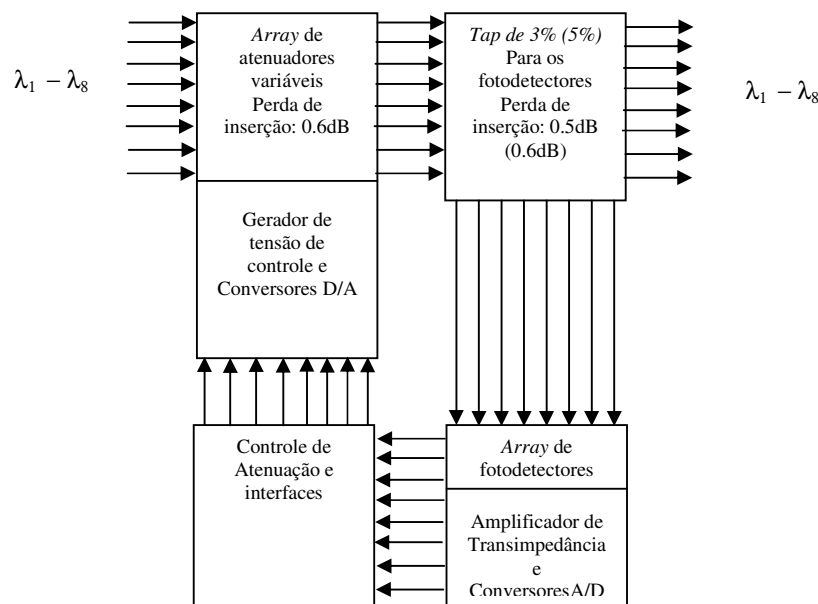


Figura 4.1: Modelo do Equalizador

As perdas de inserção descritas na figura são as perdas médias considerando os componentes definidos, que serão abordados na seqüência, perfazendo uma perda de inserção total do sistema em torno de 1dB. Os *taps* de potência são derivações óticas, o valor das derivações pode ser escolhido. Deu-se preferência para pequenas derivações (3% e 5%) para que a perda de inserção não fosse grande demais. Por outro lado, derivações menores têm um impacto nocivo, limitando a potência mínima na entrada do sistema de equalização, sendo necessário um grande ganho no amplificador de transimpedância ligado aos fotodetectores.

Isso amplia o erro do sistema devido ao ruído gerado por conversões de potências óticas muito baixas

O bloco de controle trabalha com sinais elétricos apenas, os fotodetectores fazem a tradução da potência ótica para uma corrente elétrica, essa informação é convertida para o formato digital e enviada para o controle. Ainda digitalmente, o controle envia sinais referentes a atenuação para o bloco de atenuadores, onde são convertidos para o formato analógico para posterior aplicação nos atenuadores.

Este modelo permite trabalhar individualmente com cada canal de transmissão (oito ou dezesseis canais) e o bloco de controle pode atuar em cada canal de forma independente, permitindo controles diversos de potência nos canais, além da característica principal de equalização.

O sistema realimentado permite selecionar a atenuação adequada nos canais, permitindo ajuste fino, se necessário.

O controle agrega também as funções de interface homem-máquina (IHM), como teclado de operação, display para visualização local das configurações, interface serial assíncrona do tipo RS-232 e interface *ethernet*.

Para fins de simulação, estas últimas características não são consideradas no bloco de controle, apenas é implementado o algoritmo de equalização. Todas as características físicas dos componentes são consideradas, incluindo aquelas referentes aos circuitos eletrônicos, como amplificadores de transimpedância, esperando tornar o resultado mais próximo possível do real. Como explicado mais a frente neste capítulo, não é possível simular o tempo de resposta do controle, até que se tenha o código fonte do *firmware* totalmente implementado.

4.3 ATENUADORES MEMS E DISPOSITIVO DE ATENUAÇÃO

Os dispositivos MEMS já são utilizados a longo tempo em outros segmentos industriais. Em telecomunicações, o seu uso é relativamente recente (SHIGEHARA, KENMOCHI, SANO *et al.*, 2001).

Esses dispositivos são basicamente matrizes de micro-espelhos e são usados com grande frequência como chaves em equipamentos óticos. Esses espelhos podem ser colocados em grandes quantidades em um único circuito, o que reduz consideravelmente o custo por chave. Outros dispositivos óticos podem ser criados a partir deles, que é o caso dos VOAs.

Seu funcionamento baseia-se na reflexão do feixe óptico incidente, direcionando-o para onde se deseja.

Uma matriz de espelhos é apresentada na figura 4.2, essas matrizes são utilizadas em OXCs, por exemplo, para rotear grandes quantidades de comprimentos de onda.

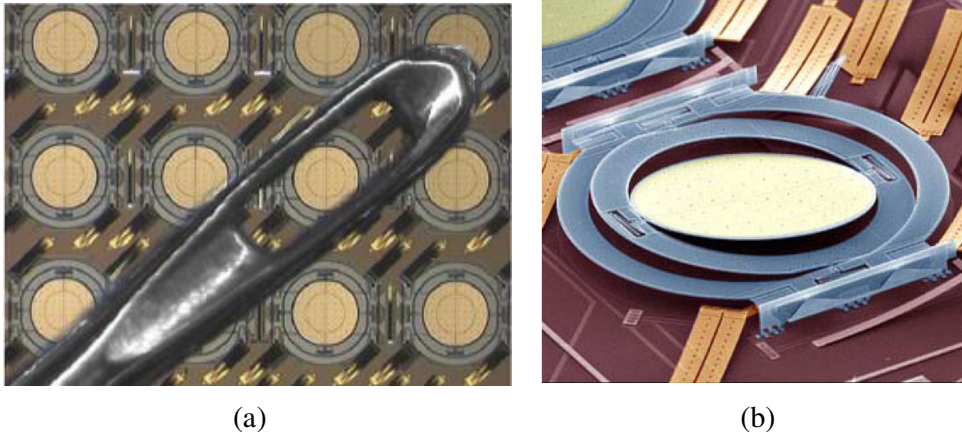


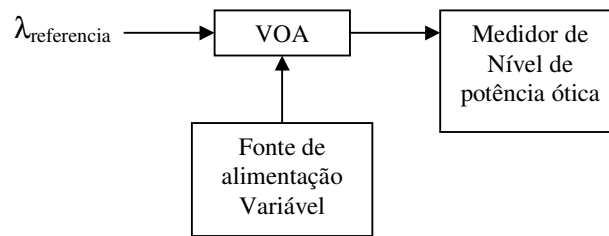
Figura 4.2: (a) Matriz de espelhos MEMS comparados a uma agulha de costura e; (b) vista de um espelho. (LUCENT TECHNOLOGIES)

Com aplicação de uma tensão externa é possível mudar o ângulo do espelho, com isso é possível mudar o percurso de um feixe incidente e direcioná-lo para um outro ponto. É dessa forma que os atenuadores baseados nesta tecnologia operam. O feixe incidente é refletido, direcionando apenas parte de sua potência óptica para uma fibra de saída. A perda de inserção é da ordem de 1dB e o tempo de resposta é relativamente baixo, dependendo da excursão da atenuação, e gira em torno de 2ms para pequenas variações de angulares. O seu custo é baixo e é de muito fácil operação, bastando aplicar uma tensão contínua nos terminais de controle referente à atenuação desejada.

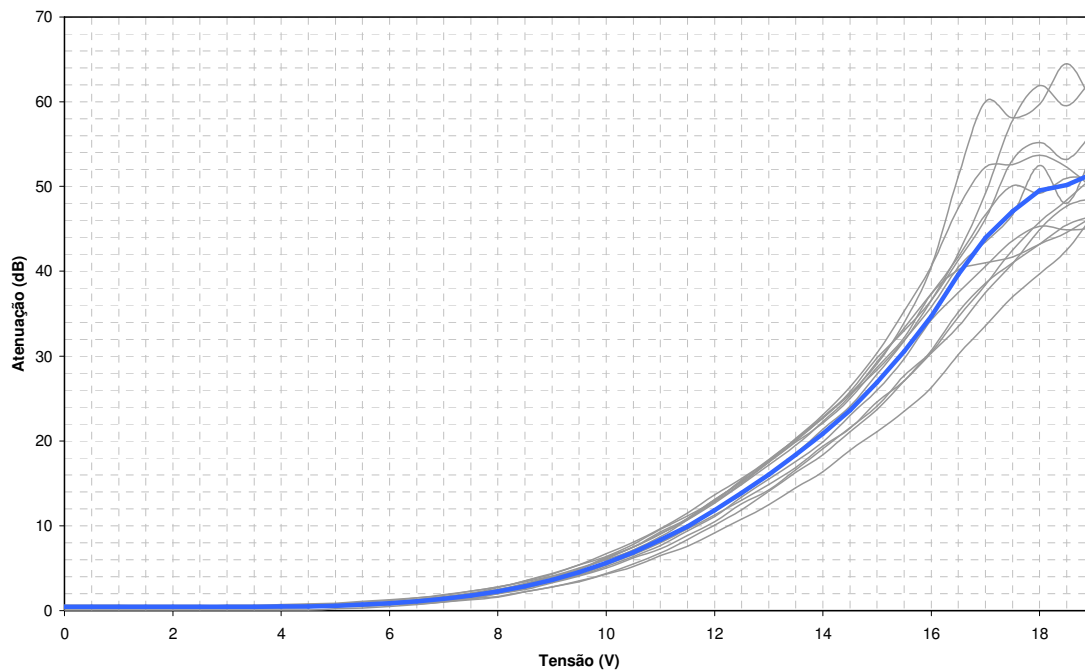
Estes dispositivos não são dependentes do comprimento de onda. O que muda é a curva de atenuação, que pode ser corrigida alterando a tensão aplicada nos terminais de controle. Ainda assim, para comprimentos de onda em 1550nm as variações da curva são muito pequenas, a diferença maior está em 1310nm. Nesse caso as curvas para 1310nm e 1550nm possuem diferenças acentuadas.

Para este projeto, foi escolhido o dispositivo VOA de um fabricante que possuísse uma variedade de componentes óticos disponíveis, entre eles, multiplexadores e demultiplexadores, fotodetectores, entre outros de interesse para o trabalho. O fabricante envia os componentes com a caracterização de cada um deles individualmente. Ainda assim, foram realizados em laboratório os testes de conformidade, para cada VOA, utilizando a

montagem da figura 4.3 (a). Com esses testes foi verificada a existência de diferenças na curva de atenuação de cada atenuador, para o mesmo comprimento de onda. Como pode ser visto na figura 4.3b, para uma tensão de 16 V aplicada nos VOA's, obtemos uma atenuação mínima de 26dB e máxima de 40dB, dependendo do atenuador. Nesse caso, para futura implementação do dispositivo de equalização, foi gerada uma curva média dos valores de atenuação x tensão, como mostra a figura 4.3(b). As linhas finas são as curvas de cada atenuador avaliado (12 atenuadores óticos no total)



(a)



(b)

Figura 4.3: (a) Modelo de montagem para caracterização dos atenuadores e; (b) Curvas de atenuação dos VOAs. Linhas finas, curvas individuais dos VOA's, linha grossa é a curva média.

Note que, para o fim do curso de atenuação as diferenças se apresentam de forma mais acentuada (a figura 4.3 foi traçada com um sinal ótico com comprimento de onda de 1550nm). Isso implica em uma correção, que o equipamento deve fazer para cada VOA independente, e deve ser levado em consideração no momento do projeto de *firmware* de controle interno. A atenuação mínima também deve ser considerada, pois esta não é nula. A atenuação mínima é a perda de inserção do dispositivo, cada um deles individualmente. As perdas de inserção são muito próximas para todos os dispositivos, com variação aparecendo quase sempre na segunda casa decimal (10^{-2}). Além disso, a perda de inserção será corrigida automaticamente no bloco de controle, uma vez que existe a realimentação do sistema via fotodetectores, como veremos mais a frente, neste mesmo capítulo. Na prática foram utilizados VOA's com conectores do tipo SC/APC, de forma a facilitar as interconexões necessárias. Ainda, o dispositivo possui duas versões de atenuação, o *dark type*, que atinge atenuação máxima com tensão de controle em zero volts, e o *bright type*, que tem atenuação máxima com o máximo de tensão (20V) nos seus terminais de controle. Imaginando que o sistema de equalização deve manter a maior potência ótica possível na saída, percebe-se que a tendência é que os atenuadores apresentem a menor atenuação possível ao longo do tempo. Por tanto, a melhor escolha é usar o dispositivo do tipo *bright*, pois com isso o consumo total de energia do sistema acaba sendo reduzido, pois a atenuação mínima é alcançada com tensão nula.

O bloco gerador possui um conversor digital/analógico de 16 bits para converter a palavra digital enviada pelo bloco de controle em uma tensão analógica para os atenuadores. Os dispositivos escolhidos operam com tensão de 0 a 20V com uma escala de 0 a 40dB de atenuação. Uma vez que o conversor digital/analógico usa tensão de referência de 5V, é necessário uma conversão, pois sem isso seria impossível chegar à atenuação máxima do dispositivo. Para tanto, um circuito analógico simples, feito com amplificadores operacionais, foi instalado nesse módulo. O menor valor de tensão medido para os atenuadores atingirem 40dB de atenuação foi de aproximadamente 16V e o maior, 18V. É desaconselhável ultrapassar a marca de 20V nos pinos de controle do VOA, de forma a não danificar o dispositivo. O circuito com operacionais deverá fornecer no máximo 18V, assim todos os dispositivos poderão chegar aos 40dB de atenuação especificados para o equalizador.

O circuito analógico utilizado para ampliar as tensões de 5V para 18V nada mais é do que um amplificador não inversor com ganho aproximadamente igual a 3,5.

Como o conversor digital/analógico tem resolução de 16 bits, em 5V, isso significa passos de $80\mu\text{V}$ ou, passos de $280\mu\text{V}$, se considerarmos o ganho dos amplificadores.

Vários tipos de dispositivos poderiam ser utilizados no projeto, a grande maioria dos amplificadores atuais atenderia as necessidades, pois apresentam grande linearidade. Uma outra característica deve ser levada em consideração nesse tipo de sistema: a imunidade ao ruído. O amplificador operacional escolhido apresenta grande imunidade a ruído, com rejeição de modo comum (CMRR – *Common Mode Rejection Ratio*) maior que 85dB e saída em *Rail-to-Rail*, o que significa que a saída não satura e pode alcançar valores um pouco mais elevados que a tensão de alimentação (na casa dos 20mV).

A preocupação com os ruídos dos dispositivos eletrônicos é elevada em todo o projeto, uma vez que estes ruídos podem afetar a precisão do sistema como um todo.

4.4 FOTODETECTORES

Os fotodetectores são componentes largamente utilizados nos sistemas óticos. Estão presentes em dispositivos e equipamentos que necessitam uma conversão opto-elétrica. Os fotodetectores (ou fotodiodos) basicamente convertem um nível de potência ótica em um valor de corrente elétrica.

Estes dispositivos são disponibilizados por uma larga gama de fabricantes de dispositivos óticos. Os fatores de decisão sobre os fotodetectores são os seguintes: baixa corrente de escuro, boa responsividade e baixo custo. A velocidade do fotodetector não é um fator limitante. Não existe a necessidade de decodificação dos sinais óticos, mas sim uma leitura de potência média por canal.

A corrente de escuro deve ser baixa para que não seja inserido um erro grande no sistema. Normalmente estes dispositivos apresentam correntes de escuro menores que 5nA. Um valor dessa magnitude pode ser facilmente desprezado. A responsividade é a característica de conversão opto-elétrica do fotodiodo, medida em [A/W], essa característica varia bastante de acordo com o fotodetector e sua aplicação (DONATI, 2000).

Os fotodetectores selecionados podem se ajustar perfeitamente aos requisitos, mais que isso, pode-se ainda optar por usar fotodetectores discretos ou encapsulados em quantidades específicas. Para este projeto foi escolhido um módulo de fotodetectores contendo oito dispositivos internos. As derivações de potência são construídas internamente ao dispositivo, possibilitando a escolha entre derivações de 9%, 5%, 3% e 1% da potência de entrada.

Da mesma forma que os atenuadores, os fotodetectores também são fornecidos com suas características médias. Assim, os componentes foram validados e suas características foram verificadas. A validação em laboratório foi feita para os componentes de 5% e 3% de derivação. A tabela 4.1 mostra os resultados obtidos e os fornecidos pelo fabricante para derivações de 5%(a) e 3%(b).

Tabela 4.1: Comparativo entre valores de tabela e valores medidos; (a) derivação de 5% e; (b) derivação de 3%.

	Sensibilidade máxima (mA/W)	Sensibilidade mínima (mA/W)	Corrente de escuro (nA)	Perda de inserção (dB)	Perda de retorno (dB)
Dados do Fabricante	70	40	5	0.6	50
Dados medidos	56.1	49.3	3.6	0.46	54.5

(a)

	Sensibilidade máxima (mA/W)	Sensibilidade mínima (mA/W)	Corrente de escuro (nA)	Perda de inserção (dB)	Perda de retorno (dB)
Dados do Fabricante	40	20	5	0.5	50
Dados medidos	36.1	31.0	3.9	0.37	54.4

(b)

A sensibilidade é medida com o fotodiodo reversamente polarizado ligado a um resistor de valor conhecido. Aplica-se uma potência ótica e mede-se a corrente no resistor. Para a medida da corrente de escuro foi retirado o sinal ótico de entrada e o conector foi coberto com sua capa protetora, impedido a entrada de luz, novamente a corrente no resistor foi medida. A perda de inserção foi medida verificando a potência ótica de saída com um medidor de potência.

Observa-se uma pequena diferença entre os valores fornecidos pelo fabricante e os valores práticos medidos. Os valores medidos são ligeiramente melhores, o que era esperado, pois o fabricante acrescenta uma margem de erro aos valores. Essa margem de erro obviamente depende de cada fabricante e sai através de estatísticas próprias às quais não se tem acesso.

A característica de perda de inserção considera a derivação usada. O valor medido para a derivação de 5% ficou muito próximo do valor calculado (0,45dB), para 3% a diferença entre o valor medido e o valor calculado (0,26 dB) é ainda maior. Ainda assim, o dispositivo

de 3% pode ser utilizado sem maiores problemas, uma vez que o valor encontra-se abaixo do esperado (valor do fabricante) para o dispositivo.

O fotodetector sozinho não é capaz de fornecer os sinais necessários para a medida de potência, é preciso utilizar uma técnica de amplificação que garanta uma leitura possível de uma gama de valores de corrente. Para tanto, um circuito conhecido como amplificador de transimpedância é utilizado. O fotodiodo polarizado com uma tensão negativa e ligado em série com um resistor já poderia fornecer um nível de tensão para o bloco de controle, relativo à potência ótica. Entretanto, como as correntes tendem a ser muito baixas, o ruído que esse tipo de circuito geraria não seria adequado. Para o circuito de transimpedância foi escolhido um modelo que utiliza amplificadores logarítmicos, para melhorar a medida de correntes muito baixas e ainda assim ser possível a leitura de correntes mais altas. Os amplificadores logarítmicos são utilizados em medições de potência, este tipo de circuito proporciona uma gama de valores de leitura maiores e mais precisas. A saída desse amplificador é proporcional ao logaritmo das correntes nas suas entradas (AMARAL, POHL, 2005).

Esse tipo de circuito foi utilizado no desenvolvimento do equalizador e a figura 4.4 mostra o desempenho do sistema para vários valores de potência ótica na entrada dos fotodetectores (derivação de 5%).

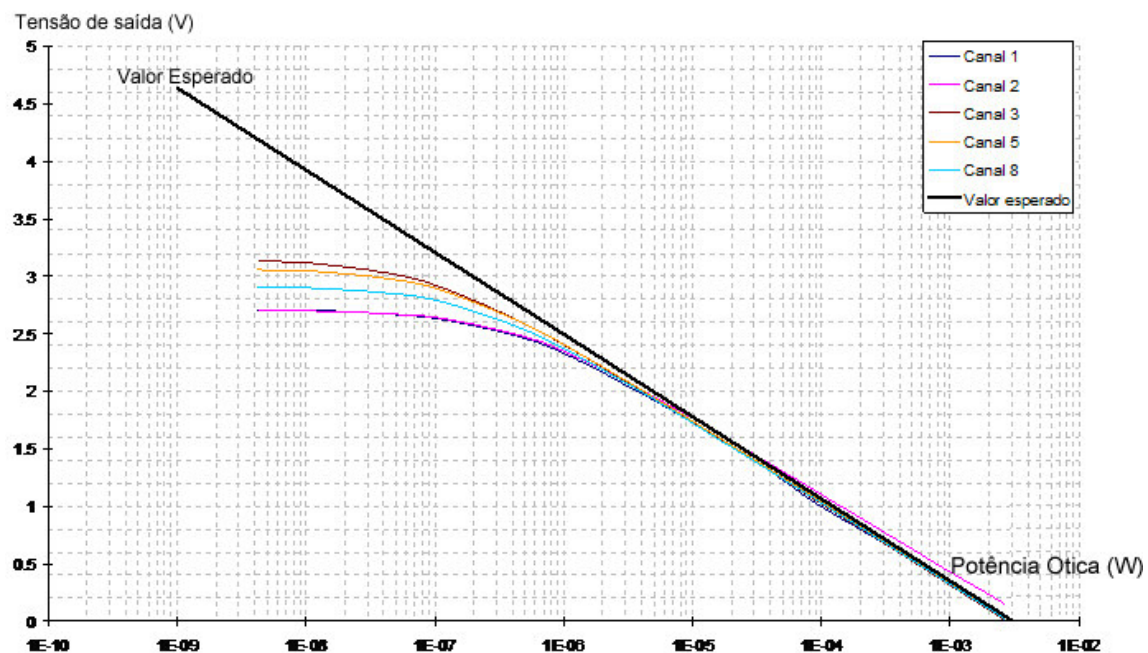


Figura 4.4: Valores de tensão de saída do amplificador de transimpedância em função da potência ótica incidente.

Os valores medidos mostram que para potências óticas muito baixas a variação da tensão de saída com relação a variação da potência ótica começa a ficar muito pequena. Em parte, isso ocorre pela aproximação do valor de potência com a corrente de escuro do fotodetector. As características dos circuitos utilizados também têm influência nesse desvio entre os valores medidos e os valores esperados. Porém, o circuito apresenta excelente linearidade para quase quatro décadas de valores de potência.

Se for considerada a potência ótica mínima de detecção como 10^{-8}W , apesar desse valor estar fora da região linear, ainda é possível a aquisição devido a precisão do circuito de aquisição (AMARAL e POHL,2005), e a potência ótica máxima como 3.10^{-3}W , pode-se chegar a um valor de potência mínimo e máximo na entrada do sistema equalizador. Esses valores seriam aproximadamente -30dBm (mínimo) e 15dBm (máximo), na entrada do fotodetector com derivação de 5%. Para derivação de 3% o valor máximo subiria para aproximadamente 20dBm. Entretanto o valor acaba sendo limitado pela potência máxima que pode ser aplicada à entrada do dispositivo, que é, de acordo com o fabricante, 18dBm ou 16dBm para derivação de 5%.

O valor máximo de leitura é perfeitamente aceitável, uma vez que o fotodiodo fará a aquisição de um canal apenas. O valor mínimo, entretanto é uma restrição do sistema. Esse valor pode ser ampliado usando uma derivação maior. No caso do fotodetector escolhido, a derivação poderia ser de 9% da potência ótica, ampliando o valor mínimo para -40dBm. O valor máximo restringe-se a 13dBm (dado do fabricante), embora o valor máximo calculado pelas relações de potência chega a 70dBm. Ao mudar a relação de derivação para 9% da potência ótica de entrada, deve-se ter em mente que a perda de inserção total do sistema é aumentada.

4.5 CONTROLE E ALGORITMO DE EQUALIZAÇÃO

O bloco de controle comanda todos os demais blocos citados até o presente momento. Mais que isso, ainda é responsável por fazer a interface com o usuário e com os demais sistemas. Esse bloco é constituído basicamente de um microcontrolador. Esse microcontrolador irá executar o algoritmo de controle automático de equalização desenvolvido, receberá as informações das potências dos canais, enviadas pelo sistema de aquisição e fornecerá as palavras digitais referentes às atenuações para o bloco de atuação, onde serão convertidas em sinais analógicos.

O microcontrolador suporta um sistema operacional *multitasking* e é capaz de executar uma série de tarefas usando um recurso chamado de *timesharing*. O *timesharing* é a capacidade de o processador dividir o tempo computacional entre as tarefas definidas, dando a falsa impressão de que estão sendo executadas ao mesmo tempo.

Além das tarefas já mencionadas, o microcontrolador controla os demais dispositivos internos, como interfaces seriais e *ethernet* e relógios de tempo real (*Real Time Clock*) e dispositivos externos, como teclado e display.

Começando pelo bloco de aquisição, a função do microcontrolador é receber os sinais digitais de tensão relacionados às potências óticas medidas nos fotodetectores. Esses valores referem-se a um percentual da potência ótica na entrada do sistema. É sobre a potência ótica na entrada que os cálculos devem ser realizados, portanto é preciso uma conversão inicial para que se saiba o valor de entrada e esse cálculo é feito internamente.

Existe ainda a calibração das perdas de inserção, tanto para os VOA quanto para os fotodetectores. Apesar de serem grandezas muito pequenas, também são consideradas e, com isso, a precisão do sistema melhora.

Todo o sistema foi projetado para que fosse possível a leitura de oito canais WDM com espaçamento de 200GHz, expansível para dezesseis canais, apenas com a inserção de módulos de aquisição e atuação.

O bloco de controle pode ser programado para equalizar automaticamente as potências, porém existe a possibilidade de operar em modo de atenuação forçada, onde o usuário do sistema especifica os valores de atenuação de cada canal, ou ainda em modo de potência de saída forçada. Neste caso o usuário especifica a potência de saída desejada e o controle muda a atenuação até chegar à potência solicitada, desde que possível. O equalizador não amplifica sinais óticos, portanto, a potência especificada não pode ser maior que a potência de entrada menos as perdas de inserção, com atenuação mínima.

O modo de equalização automático opera com um algoritmo que visa lançar para fora do sistema a máxima potência de saída alcançável. A idéia geral é utilizar a menor potência medida como base e aplicar atenuações nos demais canais de forma a igualar todos os canais a esta potência de referência. Porém, isso não pode ser feito de forma recursiva, pois no momento em que um canal que esteja sendo atenuado, sofrer uma redução de potência, o equalizador acabará tomando esse canal como nova referência e atenuará os demais. Assim, o sistema tenderá a aplicar atenuação máxima nos canais, acabando por cortar todos eles. Portanto os cálculos das atenuações deverão considerar as potências na entrada do sistema, livre de atenuação e desconsideradas as perdas por inserção.

De posse dos valores de entrada o controle verifica a variação das potências. Dessa forma, caso a potência do canal de referência aumente, o sistema escolherá uma nova referência e aplicará as atenuações nos canais, mantendo a saída com a potência máxima. Apesar de simples, o algoritmo funciona de forma satisfatória, tanto no equipamento quanto nas simulações realizadas, que serão explanadas mais adiante neste capítulo. Os resultados serão discutidos no capítulo 5.

No módulo de controle está presente a fonte de alimentação do sistema, que precisa fornecer uma potência suficiente para acionar todos os dispositivos do circuito. Essa fonte é chaveada do tipo *Buck* que abaixa a tensão de 48V de entrada e gera duas saídas de +24V e -24V. Depois disso são geradas as tensões necessárias para acionamento dos circuitos, esses valores são 3,3V, 5V, +18V e -18V.

A tabela 4.2 relaciona as características dos componentes utilizados.

Tabela 4.2: Características dos componentes óticos.

	VOA	Fotodetector e Derivação
Perda de inserção	0,8dB	0,6dB
Potência máxima de entrada	24dBm	18dBm
Atenuação	40dB	-
Interface de leitura	0 a 20V	analógica
Tempo de resposta	10ms	-
Corrente de escuro	-	5nA
Sensibilidade	-	70mA/W
PDL	0,3dB	0,05dB

4.6 SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE EQUALIZAÇÃO

Esta seção destina-se a demonstrar as simulações realizadas com o sistema de equalização dinâmica.

Uma vez caracterizados todos os componentes do sistema, já é possível realizar simulações bem precisas, obtendo respostas muito próximas do real.

Para estas simulações, utiliza-se um software especial para realizações de experimentos óticos, conhecido como *VPItransmissionMaker*[®] e *VPIcomponentMaker*[®]. Esse software é capaz de realizar as simulações e apresentar os resultados na forma de gráficos, planilhas e outros formatos (VPI PHOTONICS).

4.6.1 *VPItransmissionMaker*[®] e *VPIcomponentMaker*[®]

O VPI é na verdade um conjunto de aplicativos, compostos pelo *TransmissionMaker*[®] e o *ComponentMaker*[®], capaz de realizar as mais diversas simulações e modelamentos de sistemas de telecomunicação, incluindo a parte ótica. Esse conjunto de *softwares* é desenvolvido pela *VPI Photonics* que é uma divisão da *VPI Systems*.

O ambiente de simulação é muito parecido com o *Simulink* do Matlab, ou mesmo com o *Labview*[®] da National Instruments. O aplicativo fornece uma vasta quantidade de blocos que realizam funções específicas e, podem ser interligados para formar funções mais abrangentes.

Na parte ótica, o sistema possui blocos que simulam vários componentes conhecidos, como multiplexadores e demultiplexadores, fontes laser, EDFA's e acopladores, entre outros. Uma vasta gama de funções matemáticas são também disponibilizadas, como somadores, multiplicadores, logaritmos e etc.

Para executar uma simulação, basta conectar os blocos da forma desejada. Porém é necessário fazer todas as configurações dos blocos e do ambiente de desenvolvimento, explicando para o sistema como a simulação deve ser feita.

A figura 4.5 apresenta uma série de simulações que podem ser feitas com o VPI, extraída da página da *VPI Photonics* (VPI PHOTONICS).

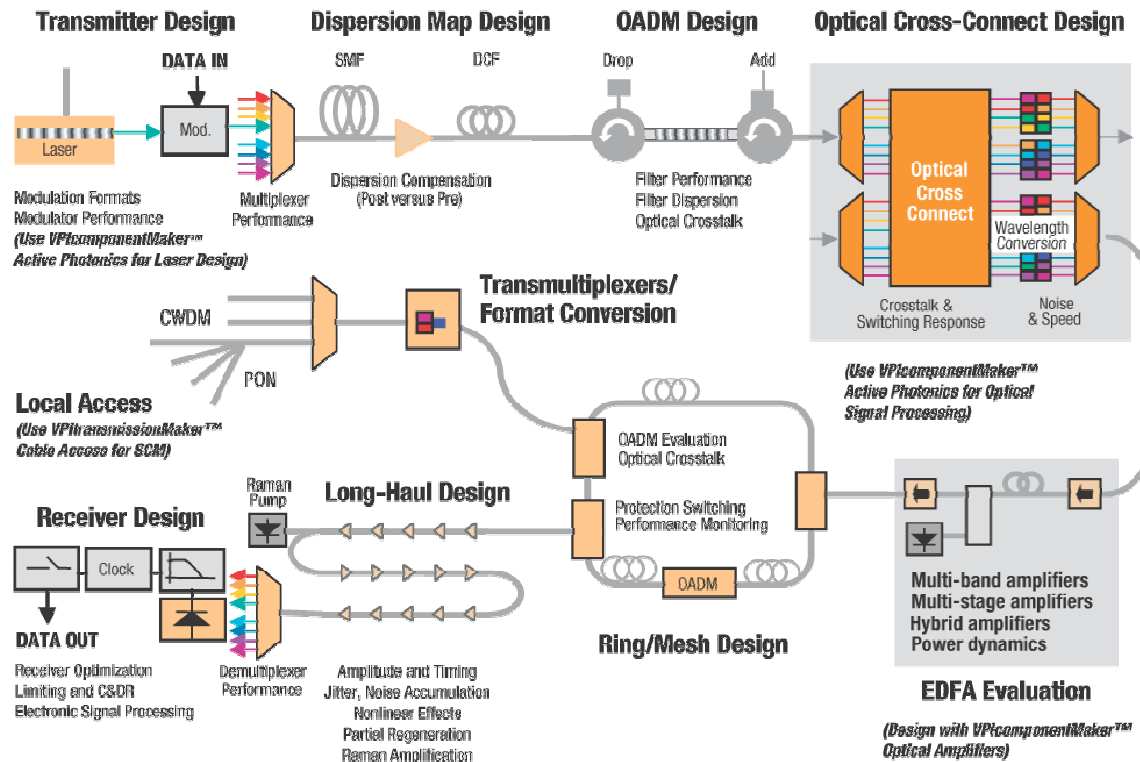


Figura 4.5: Exemplos de simulações que o VPI é capaz de realizar (VPI PHOTONICS).

O ambiente de simulação possui interface de usuário amigável mantendo todos os blocos de simulação à mão. Entretanto, pela vasta quantidade de dispositivos e funções existentes, é necessário conhecer bem o sistema para que seja fácil realizar uma simulação. Este, na verdade, é o ponto de maior dificuldade no uso do sistema. O método mais simples de resolver a questão é fazer uma busca na ajuda do sistema, que é muito bem formulada e bem completa, e esta indicará o caminho a ser seguido.

Um ponto fraco é que as equações matemáticas utilizadas nos blocos não estão disponíveis para interação com o usuário, isto é, não é possível verificar as equações utilizadas e nem alterá-las. Alguns blocos mais específicos apresentam suas equações na documentação, mas o usuário não tem acesso.

Desconsiderando este ponto, o sistema funciona de forma muito eficaz. Permite a programação das interações com linguagem *Tcl/Tk* diretamente no ambiente. Pode também interagir com funções do Matlab ou códigos escritos em *C++*.

O sistema possui um módulo de interatividade, onde é possível executar uma simulação e fazer alterações nas características dos blocos enquanto o projeto está rodando, de forma manual ou automatizada. A interface gráfica do sistema pode ser observada na figura

4.6, bem como algumas telas de visualização que o sistema disponibiliza para análise dos resultados.

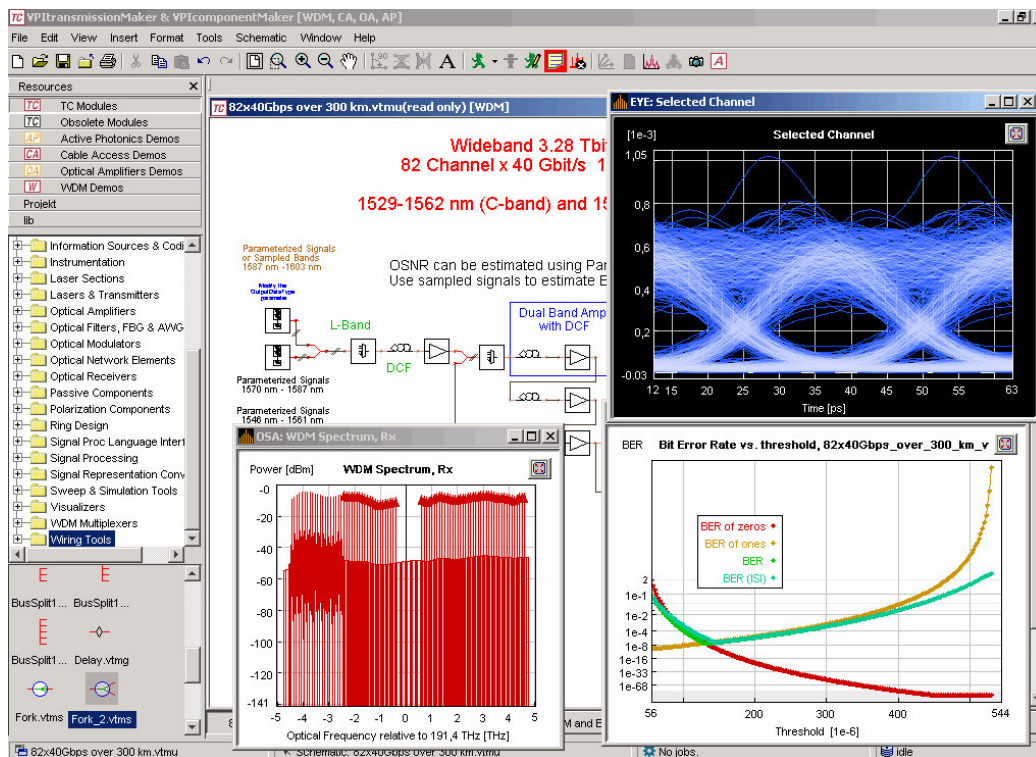


Figura 4.6: Ambiente de simulação do VPI (VPI PHOTONICS).

O sistema pode operar de diversas formas, dependendo da licença adquirida. É possível obter uma licença do tipo *Stand Alone*, em que o software roda única e exclusivamente em uma máquina pré-determinada. Há também como operar no modo Servidor, em que um número de licenças fica hospedado em um servidor de licenças. Os usuários podem executar o programa em qualquer máquina, que se conecta ao servidor e usa uma das licenças. Ainda, é possível fazer com que a própria simulação execute no servidor, e a máquina que roda o ambiente de simulação recebe apenas os dados dos resultados. Assim, essa estação de trabalho não precisa ter grande capacidade de processamento, que é absolutamente necessário para que as simulações sejam feitas.

A VPI já tem parceria com a *MathWorks*, suportando execução de códigos do Matlab em suas simulações. Uma parceria com a *Agilent Technologies* está em processo de execução, para fazer interface do *VPI TransmissionMaker*[®] com o *Advanced Design System* da Agilent, que simula circuitos eletrônicos. Isso será de grande utilidade, proporcionando a inclusão de componentes eletrônicos nas simulações com suas características conhecidas. Por exemplo, um amplificador de transimpedância poderia ser simulado utilizando os mesmos componentes

físicos (operacionais, transistores e etc.) e com o mesmo circuito eletrônico (inversor, não inversor, coletor comum e etc.), tornando a simulação muito mais real.

Na seção 4.6.2 está apresentada a rede utilizada para simulações e como a esta foi convertida em simulação do VPI.

4.6.2 Rede GIGA

A Rede Giga é um enlace ótico de testes que liga Campinas ao Rio de Janeiro, passando por várias cidades, inclusive São Paulo (SCARABUCCI, STANTON, DE BARROS, *et al*; 2005). A Rede Giga consiste em uma rede WDM com 8 canais de espaçamento 200GHz,. Essa rede visa a avaliação de dispositivos, protocolos, serviços e aplicações. Oito canais operam com tráfego de dados, até 2,5Gbps, com previsão de expansão para 16 canais com taxa de 10Gbps. As portadoras óticas utilizadas para e estudos nesta tese são as que seguem na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Comprimentos de onda e frequências do sistema.

Canal	Comprimento de onda (nm)	Frequencia (Hz)
1	1546,92	1,93934E+11
2	1547,72	1,93834E+11
3	1548,51	1,93735E+11
4	1549,32	1,93633E+11
5	1550,12	1,93533E+11
6	1550,92	1,93434E+11
7	1551,72	1,93334E+11
8	1552,52	1,93234E+11

A distância do enlace, desde Campinas até o Rio de Janeiro é de aproximadamente 670 km, Além disso, possui dois pontos de acesso estáticos, um localizado em São Paulo (Lab. Telefônica) e outro no Rio de Janeiro (RNP).

Esta Rede experimental é usada para testes e validação de equipamentos óticos e medidas experimentais, tornando-a ideal para ser utilizada como base para as simulações com

o equalizador dinâmico, uma vez que a infra-estrutura está disponível para os testes de campo com o equipamento desenvolvido. As características dos componentes óticos utilizados (valores medidos na prática) foram gentilmente fornecidos pelo CPqD, para que fosse possível executar uma simulação mais precisa. A figura 4.7, mostra a configuração atual da Rede Giga, com seus caminhos de ida e volta de Campinas até o Rio de Janeiro.

Para usar a Rede Giga como base é preciso fazer uma transcrição do diagrama da figura 4.7 para um modelo de simulação do VPI.

Inicialmente, o canal de retorno não é importante, utiliza-se apenas o canal de ida (Campinas-Rio), mantendo os *Add/Drop's*, pois são de interesse para a simulação. A figura 4.8 apresenta o modelo criado no VPI.

Esse modelo possui algumas características a mais do que a Rede GIGA. No modelo de simulação é possível usar taxas de 1,25Gbps e 2,5Gbps sem a necessidade de correção de dispersão no enlace. Porém, para 10Gbps a simulação ficou impossibilitada de fazer a recepção do sinal, levando a inclusão de fibras do tipo DCF (*Dispersion Compensation Fiber*) em pontos estratégicos do enlace. Optou-se por dosar a compensação em cada ponto do enlace, dividindo as fibras DCF para compensar entre os estágios de amplificação (Sub-estações), assim o sinal chega no Rio de Janeiro com compensação total de dispersão.

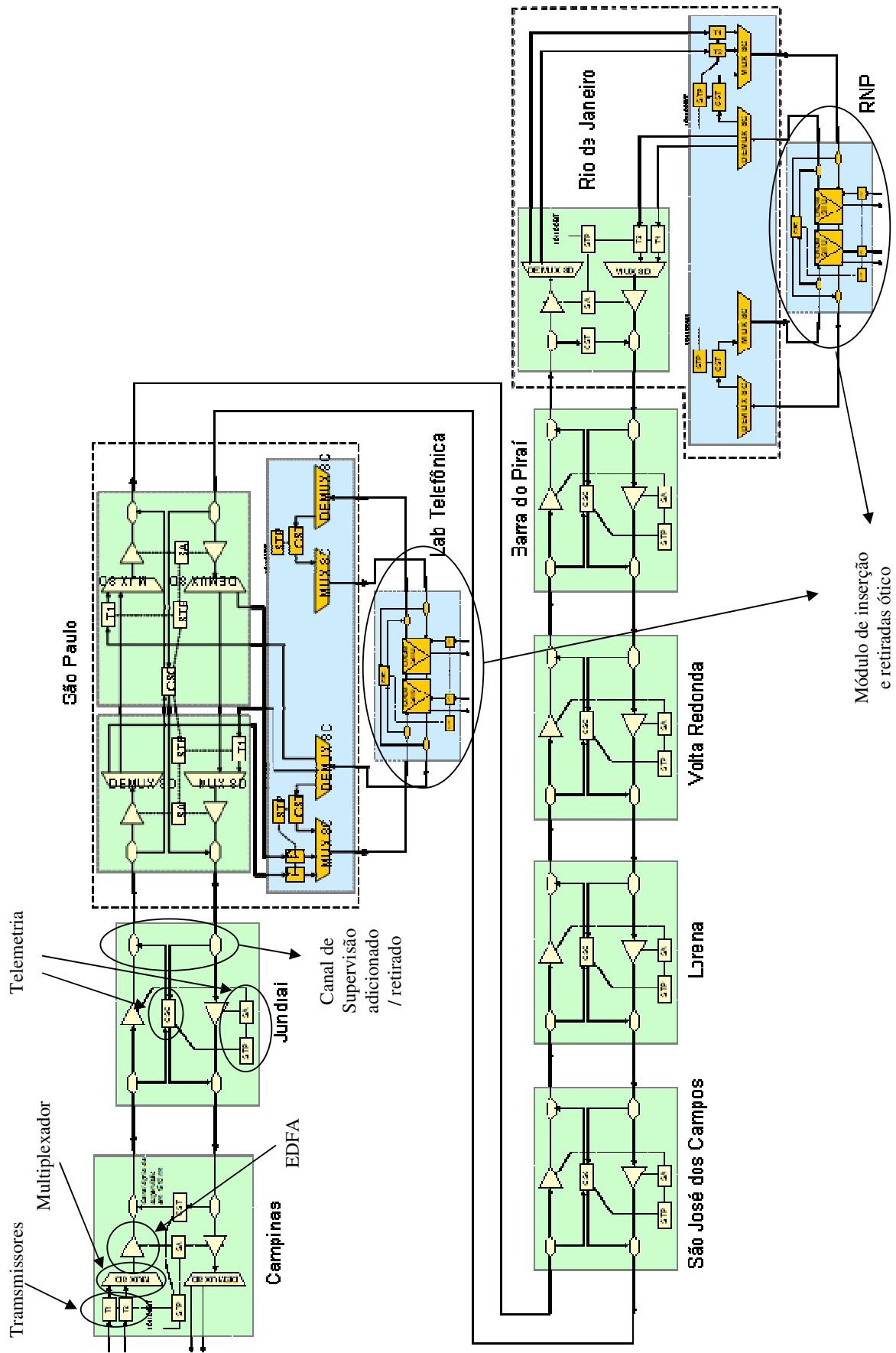


Figura 4.7: Rede Giga

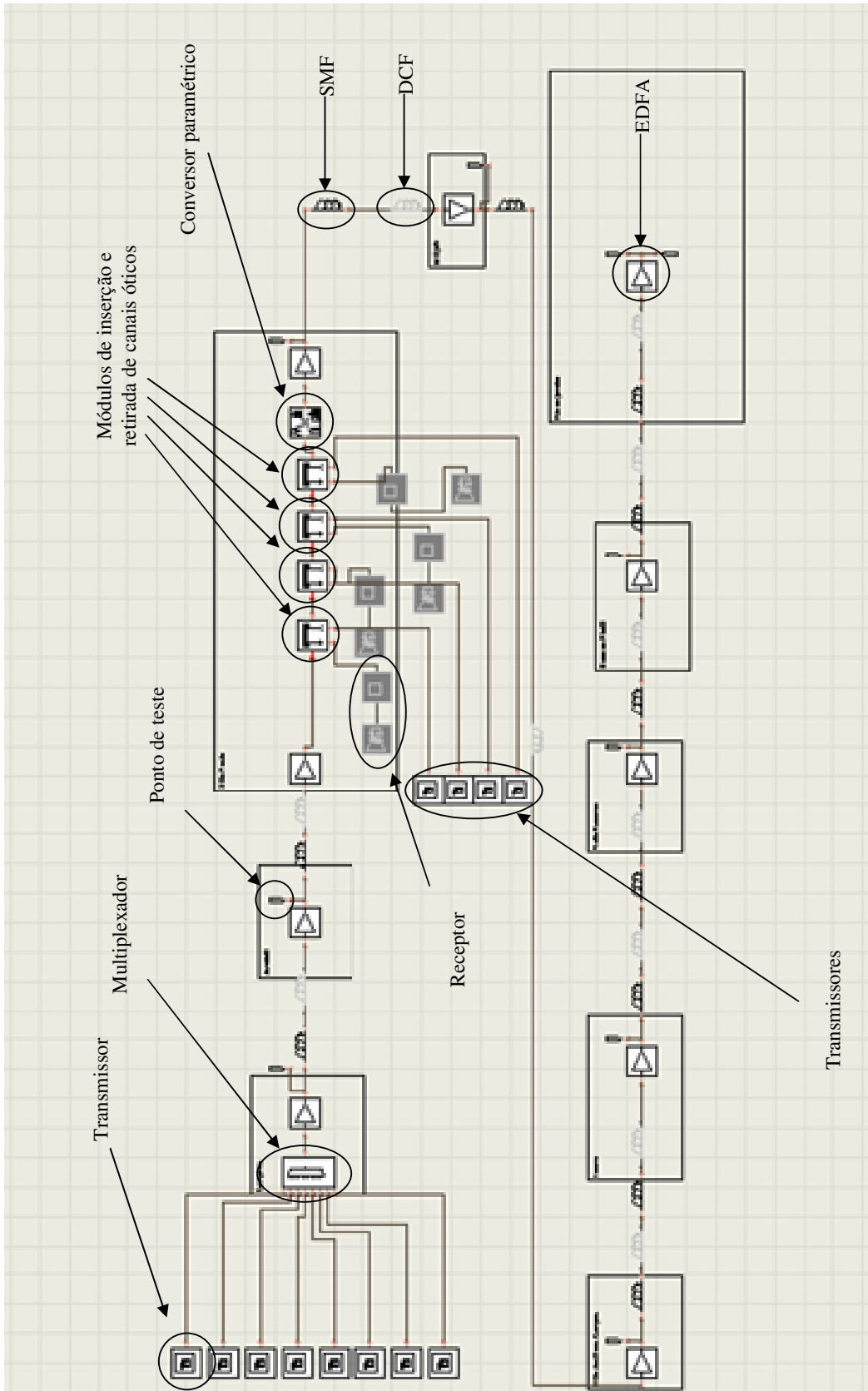


Figura 4.8: Modelo da Rede GIGA criado no VPI

O valores de dispersão e os comprimentos de fibra utilizados podem ser verificados nas tabelas 4.4 e 4.5. Foi considerada uma fibra DCF com característica de dispersão igual a -90ps/nm.km e atenuação de 0.6 dB/km .

Tabela 4.4: Características de atenuação e dispersão da Rede Giga.

Numero do Link	Links	Distância (km)	Att. SMF (dB/km)	Att.Total(dB)	Att Extra (dB)*	Dipersão SMF (ps/nm.km)	Dispersão Total (ps/nm)
1	Campinas/Jundiaí	70,3	0,339	23,83	2,54	17	1195,1
2	Jundiaí/SP	76	0,34	25,84	0	17	1292
3	SP/IAQ.MF	47,3	0,208	9,83	5,08	17	804,1
4	IAQ.MF/S.J.Campos	79,2	0,217	17,18	0	17	1346,4
5	S.J.Campos/Lorena	103,7	0,217	22,50	0	17	1762,9
6	Lorena/Volta Redonda	136,5	0,215	29,34	0	17	2320,5
7	Volta Redonda/ Barra do Pirai	38,4	0,206	7,91	0	17	652,8
8	Barra do Pirai/ RJ	111	0,212	23,53	0	17	1887

Totais **662,4** **159,98** **7,62** **11260,8**

* perda nos filtros Multiplexadores e demultiplexadores presentes no enlace

Tabela 4.5: Características de Compensação de dispersão

Numero do Link	Links	Distância (km)	Att DCF (dB/km)	Dispersão DCF (ps/nm.km)	Distância DCF (km)	Att Total (dB)	Dispersão total (ps/nm)
1	Campinas/Jundiaí	70,3	0,6	-90	13,27	7,96	-1195,1
2	Jundiaí/SP	76	0,6	-90	14,35	8,61	-1292
3	SP/IAQ.MF	47,3	0,6	-90	8,93	5,36	-804,1
4	IAQ.MF/S.J.Campos	79,2	0,6	-90	14,96	8,97	-1346,4
5	S.J.Campos/Lorena	103,7	0,6	-90	19,58	11,75	-1762,9
6	Lorena/Volta Redonda	136,5	0,6	-90	25,7	15,47	-2320,5
7	Volta Redonda/ Barra do Pirai	38,4	0,6	-90	7,25	4,35	-652,8
8	Barra do Pirai/ RJ	111	0,6	-90	20,96	12,58	-1887

Totais **662,4** **125,12** **75,07** **-11260,8**

A característica de dispersão considerada aceitável é inversamente proporcional ao quadrado da taxa de transmissão, que é 1000ps/nm para uma taxa de 10Gbps . Pode-se verificar que em vários pontos do enlace ultrapassam essa marca, e a dispersão total é suficiente para degradar o sinal transmitido. Para uma taxa de 2.5Gbps , a dispersão fica em torno de 16000ps/nm , que está ainda longe da dispersão total calculada para o enlace (NETTEST).

A compensação de dispersão foi feita zerando a dispersão em cada ponto do enlace. Isso foi feito de forma a facilitar os cálculos e a simulação final. Entretanto, o ponto ótimo de

compensação deve ser considerado para um valor de dispersão ligeiramente maior que zero, para que haja redução no impacto dos efeitos não lineares da fibra.

A tabela 4.4 mostra as distâncias calculadas para a compensação de dispersão da rede Giga. O tamanho do enlace aumenta em 125 km, aproximadamente, chegando quase a 800 km de enlace. O que aumenta também é a perda de potência, inserida na rede pelo acréscimo das fibras DCF, usadas com atenuação média de 0,6dB/km. Essa perda não afeta profundamente o sistema, entretanto o ganho dos amplificadores mudará em cada estágio de amplificação, devido à mudança nos valores das potências de entrada.

Outra alteração do modelo com relação à Rede Giga original é em relação aos *Add/Drops*, que hoje são fixos, mas na simulação pode-se inserir e retirar quatro canais em São Paulo. Foram escolhidos os canais 1, 4, 5 e 8 pois manipulando as potências destes canais é possível gerar um forte *crosstalk* nos canais adjacentes (2, 3, 6 e 7), conseguindo assim cobrir todos os canais presentes. Por exemplo, com potência alta no canal 1 é possível gerar *crosstalk* no canal 2 e, de forma reduzida, no canal 3. O mesmo ocorre para potências altas no canal 4, gerando interferência maior no canal 3 e menor no canal 2.

O Rio de Janeiro foi considerado fim de curso, e os resultados obtidos na simulação têm esse ponto como sendo sua referência.

As características das fibras SMF (*Single Mode Fiber*) utilizadas são as mesmas fornecidas pela Fundação CPqD e são mostradas na tabela 4.4. Nesta mesma tabela, as atenuações extras consideradas são devido aos filtros multiplexadores e demultiplexadores, também com características dos componentes usados na Rede Giga.

Outro ponto importante é a caracterização dos amplificadores da rede. As características de ganho dos EDFA's do enlace são apresentadas na figura 4.9, que relaciona comprimento de onda e ganho do amplificador, para duas potências óticas totais de entrada.

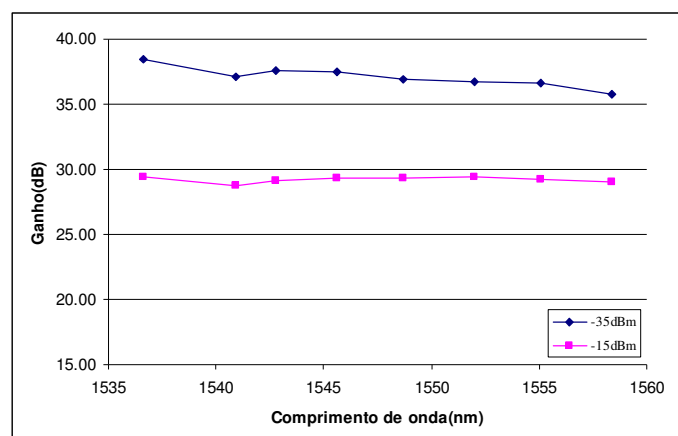


Figura 4.9: Perfil de ganho dos amplificadores da Rede Giga. Valores para potência de entrada em -35dBm e -15dBm.

Para os valores de comprimento de onda utilizados, o perfil de ganho do amplificador é quase plano, pois se encontram na região mais plana e de ganho mais baixo do EDFA (capítulo 2).

O EDFA simulado no VPI pode operar com ganho fixo, ou obter os valores de ganho a partir de um arquivo especificado. A segunda opção é mais interessante para ser utilizada, pois é o que acontece nos sistemas reais. A técnica nesse caso envolve a criação de um arquivo tipo texto que relaciona alguns comprimentos de onda aos ganhos medidos no enlace. Entretanto, é preciso tomar cuidado com as potências de entrada dos EDFA's da rede, pois cada amplificador acaba tendo em sua entrada uma potência total diferente. Para compensar esse problema, foram gerados 3 arquivos diferentes, com ganhos para -5dBm, -15dBm e -25dBm. Então, a potência total de entrada foi medida na simulação a cada estágio, começando pelo primeiro amplificador. A cada medida, a simulação deve ser executada novamente, para verificar as potências antes de cada estágio, fazendo-se isso do primeiro ao último amplificador.

Assim, os componentes óticos chaves foram configurados com medidas tomadas na Rede Giga. A saída na recepção (Rio de Janeiro) é mostrada na figura 4.10. Esse resultado foi conseguido com taxa de 1.25Gbps e com todos os canais circulando em todo o enlace (não há canais retirados ou inseridos em São Paulo). A compensação de dispersão está desabilitada, como na Rede Giga original. É perceptível um pequeno desnível de potências entre os canais, da ordem de 8dB, devido aos perfis de ganho dos amplificadores de linha e aos filtros óticos utilizados.

Partindo deste ponto, o equalizador dinâmico de potências pode ser implementado na simulação e incluído na rede e seu comportamento pode ser verificado.

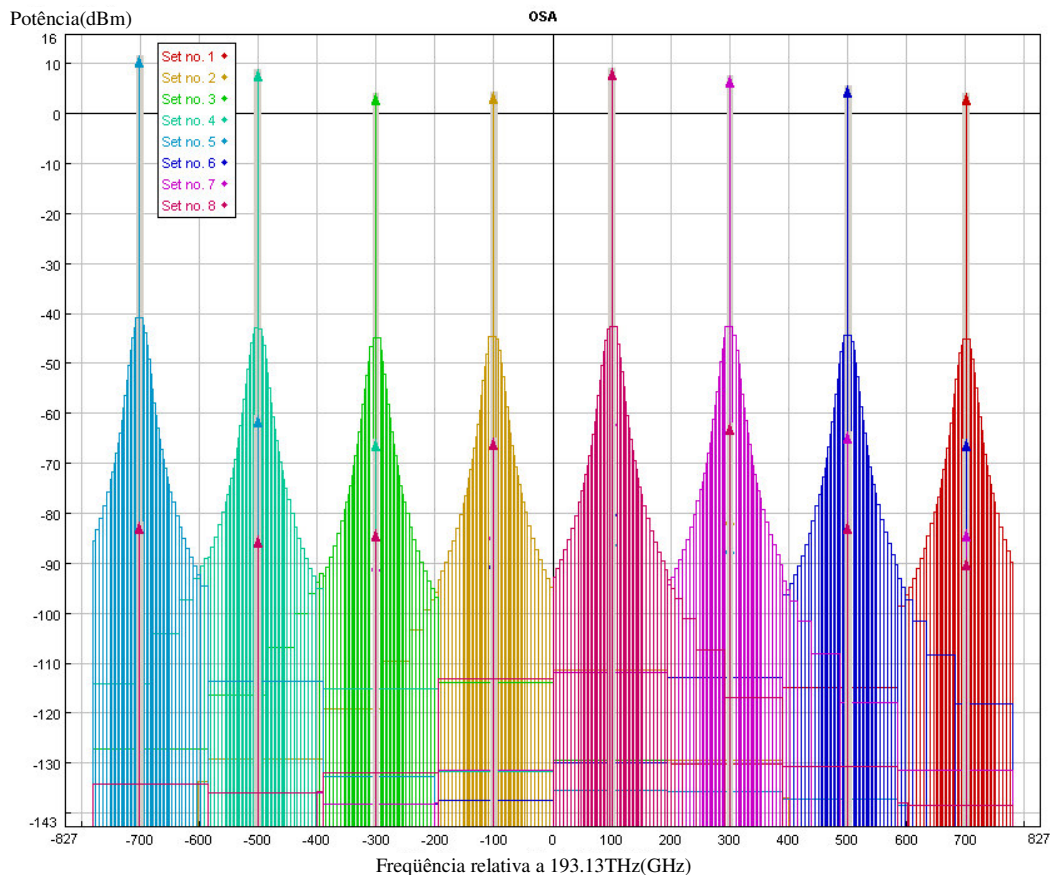


Figura 4.10: Potências óticas na recepção

4.6.3 Equalizador Dinâmico de Potências Óticas

O equalizador simulado nada mais é que a implementação dos blocos apresentados na seção 4.2, considerando as características dos componentes citados e adotando um formato para que o bloco de controle possa ser simulado. A princípio, optou-se por elaborar o bloco de controle programaticamente através de *scripts* em linguagem *Tcl*.

A etapa de atenuação do EDPO é formada por um simples atenuador, no qual a atenuação é configurada via programação do VPI. Essa atenuação é conseguida matematicamente, com os valores de potências obtidos pela etapa de aquisição. A figura 4.11 exhibe um diagrama de simulação do EDPO em sua primeira versão, operando com programação *Tck*. O Bloco de controle não aparece no diagrama, uma vez que é executado internamente pelo *script* de programação.

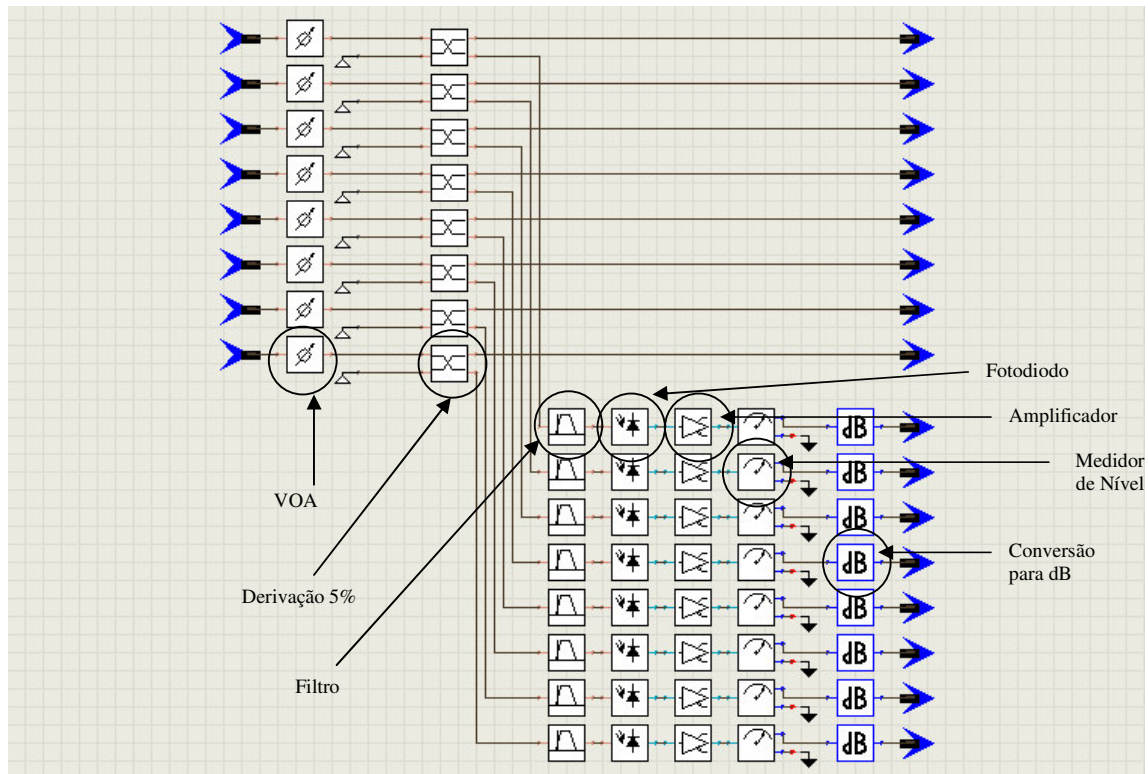


Figura 4.11: Diagrama do EDPO simulado.

O diagrama mostra os atenuadores variáveis, a derivação de 5% do sinal de entrada, que são direcionados para as etapas de aquisição. Essa etapa consiste em um filtro passa faixa antes do fotodetector, com banda igual a do Demultiplexador utilizado para separar os canais. Mais tarde, esse filtro de entrada foi retirado, pois não havia real necessidade do seu uso. O diodo fotodetector possui as mesmas características do fotodetector utilizado no sistema implementado. Esse bloco de fotodetecção retorna um valor elétrico de corrente que se relaciona com a potência ótica de entrada. Essa corrente é inserida no bloco de amplificação de transimpedância, com ganho suficiente para retornar os valores de tensão referentes à entrada do EDPO, para agilizar os cálculos efetuados pelo bloco de controle. Pelo mesmo motivo, é inserido um bloco medidor e uma conversão de valores para decibéis. O programa de controle receberá como variável exatamente a potência de entrada de cada canal do EDPO.

Esses valores só podem ser passados como parâmetros para o programa com o auxílio de blocos específicos conhecidos como *PostValues* e *MagicPrefix*. O primeiro funciona como uma variável que guarda valores e pode ser acessada via *script*. Este bloco é usado nas saídas das etapas de aquisição. O segundo é usado para receber um valor e aplicado a uma variável pré-programada, como por exemplo, a atenuação de um dos atenuadores. No caso

programado, o *MagicPrefix* não é necessário, pois os valores de atenuação de cada atenuador podem ser acessados diretamente pelo programa. Esse bloco, entretanto se mostrará muito útil na segunda técnica de equalização apresentada mais a frente.

De posse dos valores necessários, o *script* de controle executa todos os cálculos necessários e aplica as alterações. Durante a simulação é possível perceber um atraso de uma iteração até que o EDPO atue equalizando as potências.

O programa de controle primeiro configura as características iniciais do sistema, como potência média do laser e atenuação inicial de 0dB. Após uma iteração da simulação, as medidas de potência já estão disponíveis. Então, o controle escolhe o canal de menor potência ótica como referência, e baseado nele, calcula as atenuações necessárias para cada canal.

A partir da segunda iteração o processo torna-se um pouco mais complicado. O controle volta a escolher o canal de menor potência ótica para referência, neste caso, entretanto, os canais estão equalizados. O controle baseia-se então na atenuação aplicada a cada atenuador do sistema na iteração anterior e recalcula a potência de entrada. A partir daí é possível escolher um canal de referência e recalcular as atenuações, equalizando as potências. Dessa forma, evita-se que o equalizador continue aplicando atenuações maiores nos canais, ao longo do tempo, até que todos sejam cortados, isto é, seja aplicada atenuação máxima de 40dB em todos eles. Assim, o equalizador considera sempre a potência de entrada do sistema para o cálculo da atenuação, garantindo potência máxima na saída.

Essa medida não seria necessária se as potências de entrada não variassem nunca, mas como o EDPO não pode pré-supor esse tipo de funcionamento, essa parte do programa teve de ser implantada.

Para medir a eficiência desse código foi implantado no mesmo *script* de equalização um código que varia aleatoriamente as potências médias dos lasers de transmissão. Assim foi possível observar, sempre com uma iteração de atraso, a equalização de potências feita de forma dinâmica (figura 5.1(a) e figura 5.1(b)). Ainda, como o programa sempre escolhe o canal de menor potência, a potência de saída dos canais do EDPO é sempre a máxima possível. As potências dos canais equalizados é apresentada na figura 4.12, com o EDPO colocado pouco antes da recepção, no Rio de Janeiro. O desnível de potências agora é 0,6dB, que aparece no canal de referência (neste caso o canal 6), devido à perda de inserção do atenuador, que é considerada quando a atenuação deve ser zero. Verifica-se, comparado a figura 4.10 e 4.12, que existe uma grande perda de potência ótica, na ordem de 8dB para o canal de potência mais baixa. Essa perda ocorre basicamente na abertura dos canais, com a

inserção do demultiplexador e no multiplexador, sendo que cada um desse foi configurado com uma perda de inserção de 3dB. A perda de inserção do EDPO configurado é de 1dB.

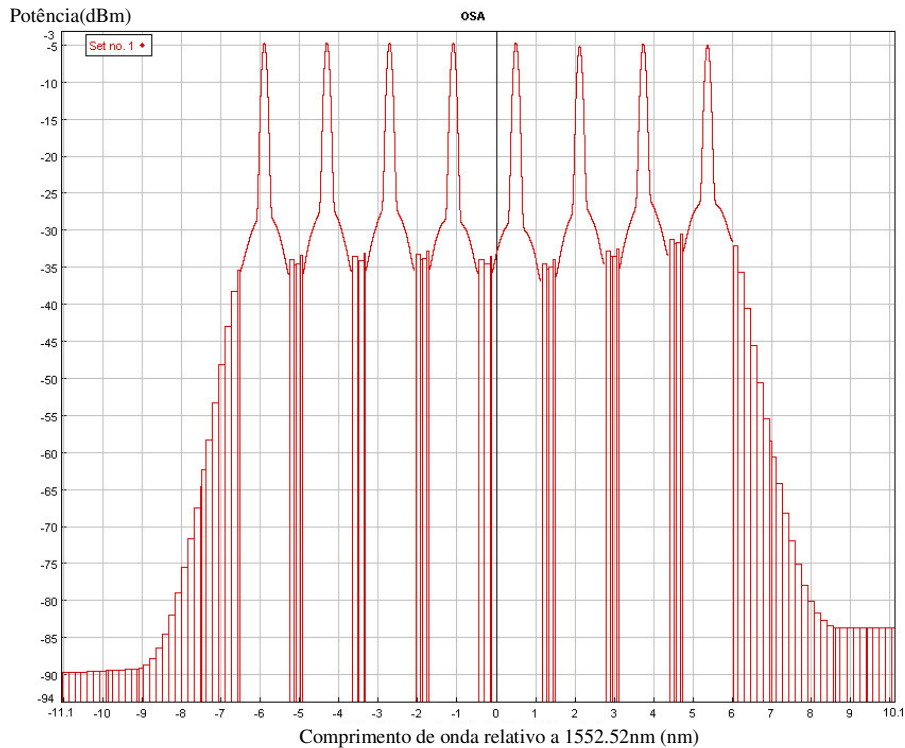


Figura 4.12: Potências equalizadas na saída do EDPO.

Quando o EDPO encontra um canal com potência muito baixa, ou na falta de um canal, este é desconsiderado para os cálculos de atenuação, pois de outra forma o EDPO acabaria por atenuar todos os canais com atenuação máxima.

A prática de simulação com *scripts* funciona de forma satisfatória para alguns modelos de simulação. Com dois EDPO's na rede a complexidade de programação aumenta exponencialmente e, portanto, não é recomendada quando há a necessidade de usar uma quantidade grande de variáveis. Mesmo assim, esta técnica permitiu o uso de dois EDPO's na rede Giga, um na recepção e outro em São Paulo, onde alguns canais poderiam ser retirados e re-colocados no enlace ótico.

Com o intuito de melhorar o modelo de simulação do EDPO, algumas modificações tiveram de ser feitas, alterando a bloco de controle via programa e inserindo-o como blocos no diagrama de simulação do VPI.

Todos os cálculos executados pelo *script* de programação foram transferidos diretamente para o diagrama de simulação, transformando o diagrama da figura 4.11 no diagrama apresentado na figura 4.13, já incorporando o multiplexador e demultiplexador.

Nesse caso é utilizado o *MagicPrefix*, que altera automaticamente as atenuações. Todo o cálculo das atenuações, escolha do canal de menor potência e aplicação de atenuação está presente neste diagrama. A técnica exige o uso de blocos de memória do VPI e comparações lógicas para decisão do canal de referência.

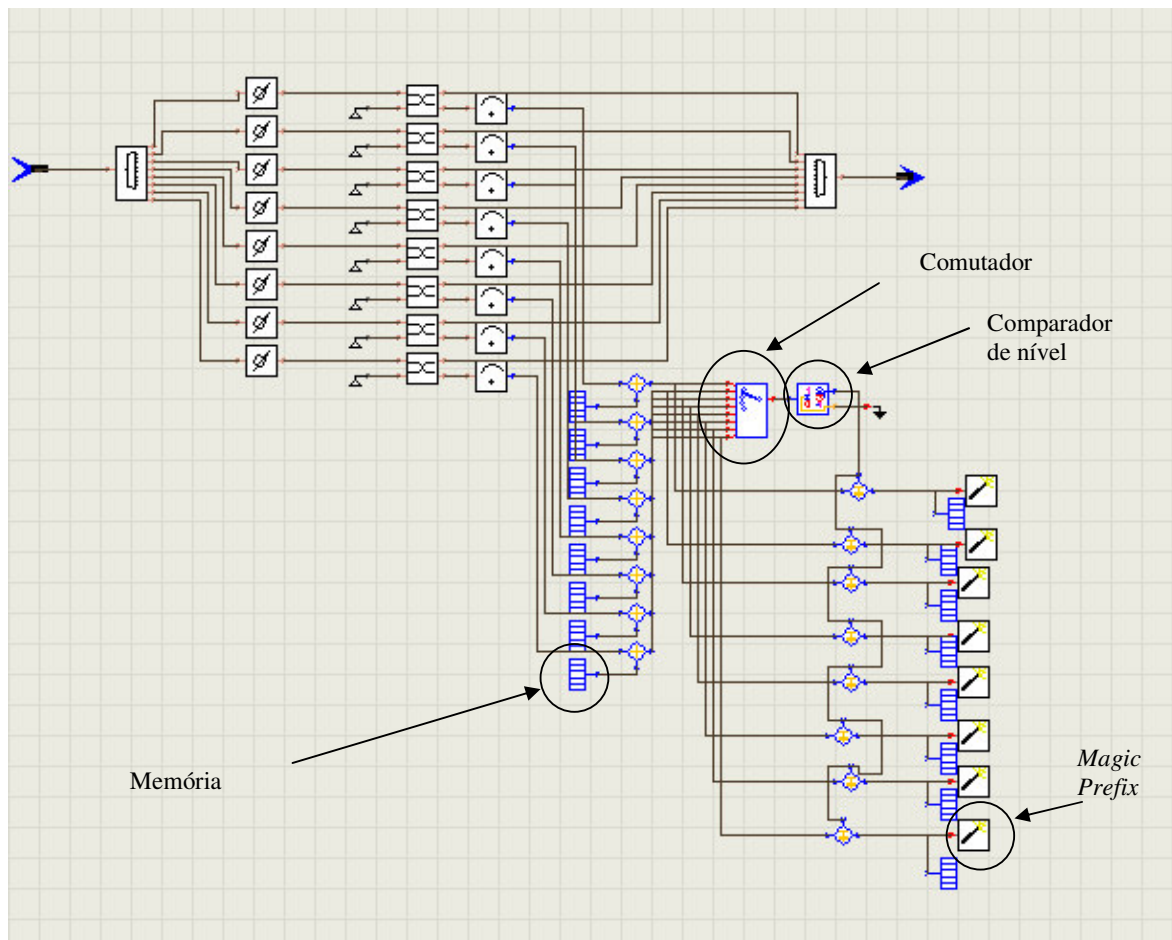


Figura 4.13: Nova versão do EDPO criado totalmente com blocos do VPI.

Essa nova versão apresenta os mesmos resultados do modelo anterior, com a diferença de que a simulação é executada no VPI muito mais rapidamente e com menor uso dos recursos da máquina onde a simulação é executada.

Os resultados obtidos com ambos os modelos são discutidos no Capítulo 5.

4.6.4 Controle de Laser de Bombeamento do EDFA

Uma característica analisada com simulações foi a de transientes de ganho do EDFA. Como visto no capítulo 2, esses transientes decorrem da variação da potência ótica total de entrada no amplificador, acarretando em uma mudança no ganho.

Para esta simulação utiliza-se a técnica eletrônica de compensação de transientes operando diretamente na corrente de polarização do laser de bombeamento.

Por se tratar de uma técnica conhecida, o VPI já disponibiliza uma simulação desse tipo pronta, que acompanha o *software* como exemplo de uso do aplicativo. Baseado nessa simulação, pequenas alterações puderam ser feitas adquirindo resultados mais completos que a simulação original. A figura 4.14 mostra a modelagem da simulação do VPI.

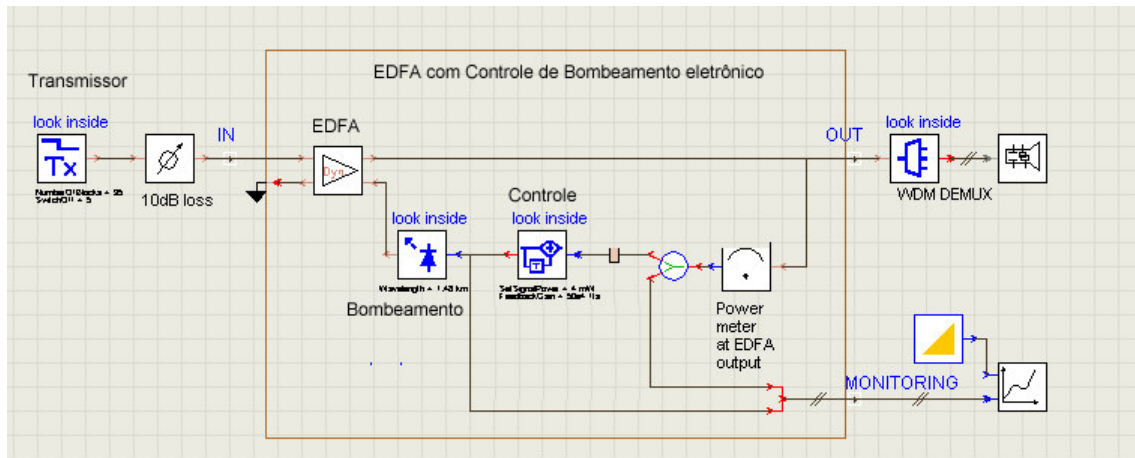
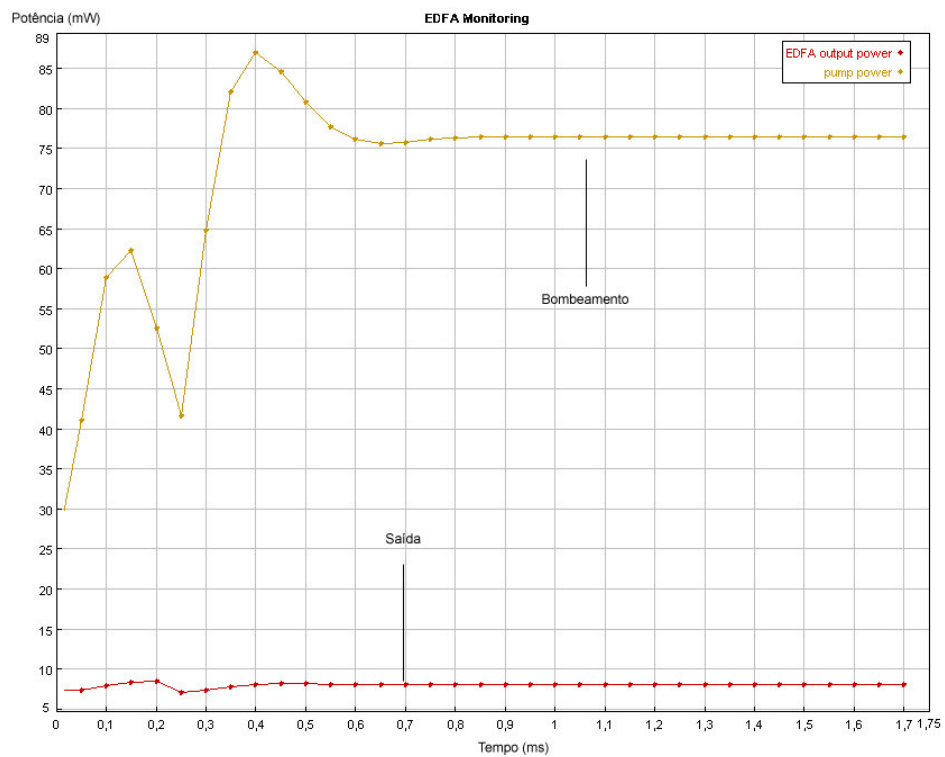


Figura 4.14: Controle de laser de bombeamento simulado.

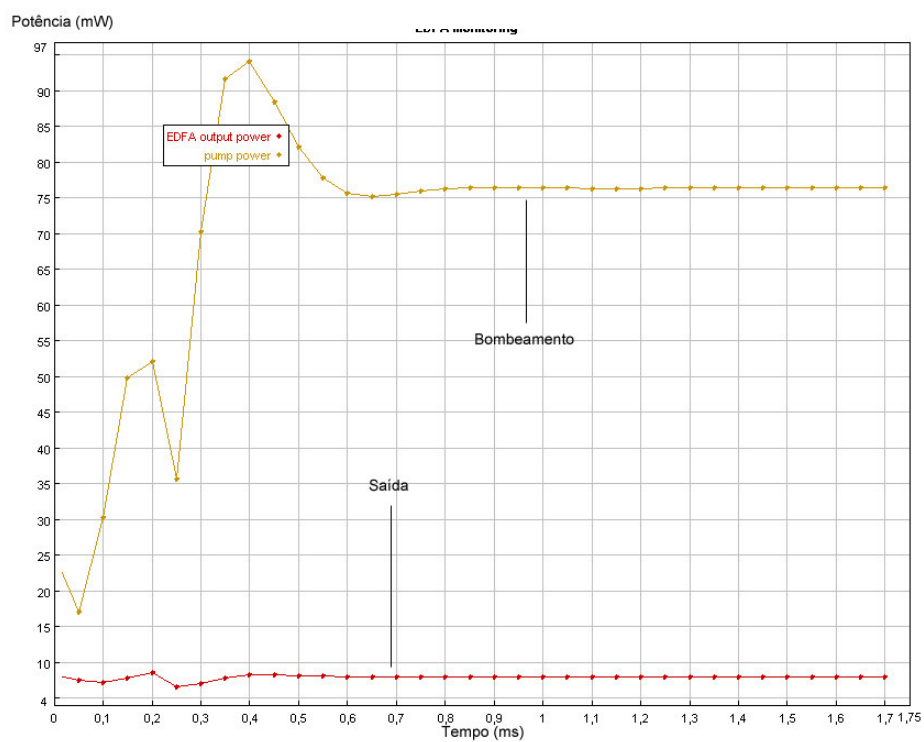
O modelo utiliza a técnica de realimentação, usando a potência de saída total do amplificador como base para cálculo da corrente do laser de bombeamento, através de um bloco de controle, que altera a potência do laser de acordo com a necessidade. O sistema utiliza quatro canais WDM quaisquer, com potências de 1mW, e em um determinado momento, um dos canais é cortado, sendo possível observar a variação da potência do laser de bombeamento juntamente com a variação de potência de saída do EDFA. O amplificador não opera em regime de saturação.

Alterando levemente o bloco disponível é possível variar o número de canais cortados de 1 até 3, aumentando assim a variação de potência ótica total na entrada do amplificador, mudando a característica do transiente gerado. O EDFA opera em regime de saturação.

Como resultado pode-se observar as figuras 4.15(a) e 4.15(b), que mostram a variação do laser de bombeamento para 1 e 2 canais retirados, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 4.15: Transientes de potência do EDFA; (a) 1 canal cortado e; (b) 2 canais cortados.

No momento do corte dos canais é possível observar uma pequena variação instantânea de potência de saída, que logo é corrigida pelo sistema de supressão de transientes. Percebe-se que, para uma queda de potência de saída maior, o transiente piora, o que pode ser visto pela maior variação da potência de bombeamento até a estabilização.

As variações apresentadas no bombeamento representam a resposta ao degrau (desnível de potência) do sistema de controle de bombeamento. Como a simulação é feita em ambiente matemático computacional ela pode apresentar algumas diferenças com relação a sistemas reais devido ao tempo de resposta do controle, que no caso da simulação é praticamente em tempo real.

Para sistemas reais, é aconselhável que o tempo de resposta seja o menor possível, de forma a corrigir variações rápidas de potência. Neste caso, equalização dos canais, entretanto não é feita, pois uma vez alterado o bombeamento o perfil de ganho do amplificador também se altera, sendo necessário um dispositivo para eliminar as diferenças oriundas do perfil de ganho irregular. Esse dispositivo poderia ser o EDPO apresentado neste trabalho.

O modelo de EDPO apresentado não é capaz de eliminar os transientes de ganho dos amplificadores a fibra dopada. A melhor opção então seria utilizar um conjunto de técnicas capazes de solucionar os dois problemas, equalização e controle de ganho.

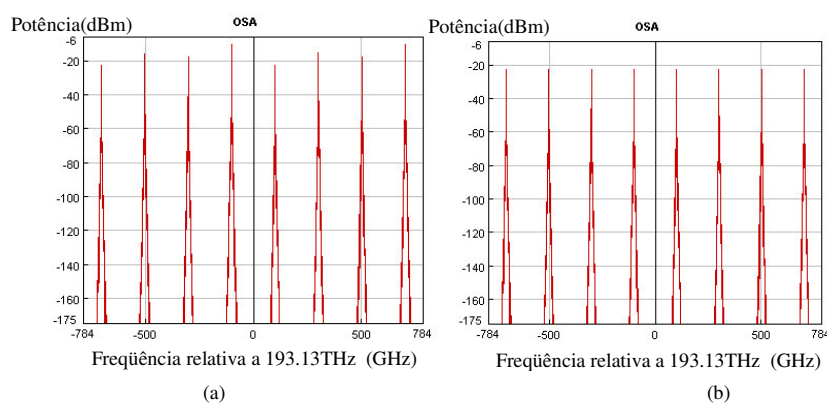
O EDPO apenas equilibra as potências dos canais. Quando um canal é cortado ou sua potência ótica fica abaixo de um limite mínimo, configurado no EDPO, este canal é desconsiderado para o cálculo da equalização.

CAPITULO 5

RESULTADOS E CONCLUSÕES

5.1 RESULTADOS SIMULADOS

Os resultados iniciais se referem ao funcionamento dinâmico do equalizador. Fazendo as potências óticas dos transmissores variarem aleatoriamente, iniciando com 0dBm, pôde-se verificar se o algoritmo de equalização estava funcionando de forma satisfatória. A figura 5.1a mostra a saída do equalizador, colocado antes dos receptores, no terminal localizado no Rio de Janeiro na rede Giga, na primeira iteração. As potências óticas são apresentadas com desequilíbrio. Os resultados são medidos na entrada dos receptores de final de linha. Na segunda iteração (Fig. 5.1b), as potências óticas já aparecem equilibradas. Na iteração número 4 (Fig. 5.1c) a potência ótica do canal 1 (maior frequência) é configurada para -10dBm e na iteração 5 (Fig. 5.1d) o equalizador entra em ação. Os resultados apresentados são de simulação com a rede Giga operando a 10Gbps, com compensação de dispersão, pois é a taxa em que o equalizador deve ser capaz de operar, a distância total do enlace, com a fibra de compensação, é de 738km. Os componentes utilizados possuem as características apresentadas no capítulo 4. As potências dos lasers na transmissão são de 0dBm e são variadas aleatoriamente em alguma iterações



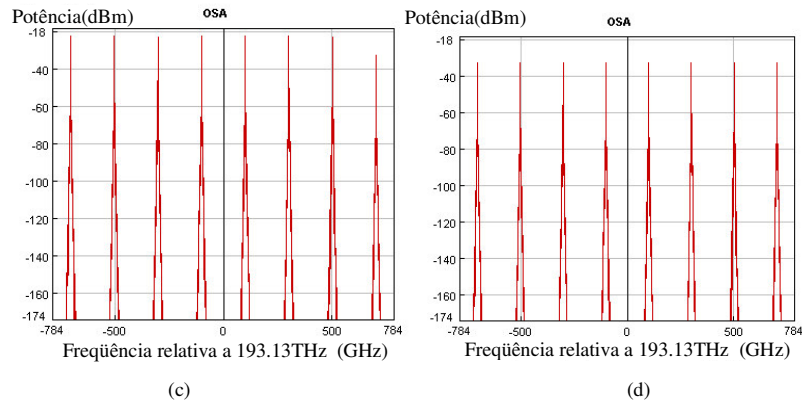


Figura 5.1: Algoritmo de equalização em funcionamento. (a) Iteração 1; (b) iteração 2; (c) iteração 4 e; (d) iteração 5. Taxa de 10 Gbps, potências de 0dBm na transmissão.

De forma a medir a eficiência do sistema em simulação, verificou-se alguns pontos de importância para redes óticas, como o OSNR e a BER do sistema. Usa-se a Rede Giga como base, operando com taxa de 10Gbps e compensação de dispersão e com os canais 1, 4, 5 e 8 sendo retirados em São Paulo e colocados no mesmo ponto, com novos transmissores e potências óticas distintas. Dessa forma é possível verificar os efeitos da equalização na recepção e no *Add/Drop* em São Paulo, sendo possível variar as potências dos transmissores neste ponto e verificar o impacto causado no enlace. Exagerando na variação das potências inseridas, foram-se resultados mais visíveis.

O desnível de potências na recepção, em função da distância do enlace, sem equalização é mostrado na figura 5.2, para algumas potências óticas escolhidas para os transmissores em São Paulo. A distância total do enlace é 783 km.

Na figura 5.2, em cada amplificador de linha é feita a medida das potências dos canais. Essa medida é feita com na rede Giga com módulos de inserção e derivação em São Paulo. As potências dos canais inseridos em São Paulo (canais 1, 4, 5 e 8) são alteradas em cada simulação. São então executadas quatro simulação, uma sem canais adicionados em SP, e outra três com canais adicionados com 0dBm, 5dBm e 10dBm respectivamente. Com isso pode-se medir o desnível de potência ao longo do enlace, para diferentes potências óticas colocadas no módulo de derivação e inserção ótico (MOCKI, KALINOWSKI e POHL, 2005; MOCKI, KALINOWSKI e POHL, 2006).

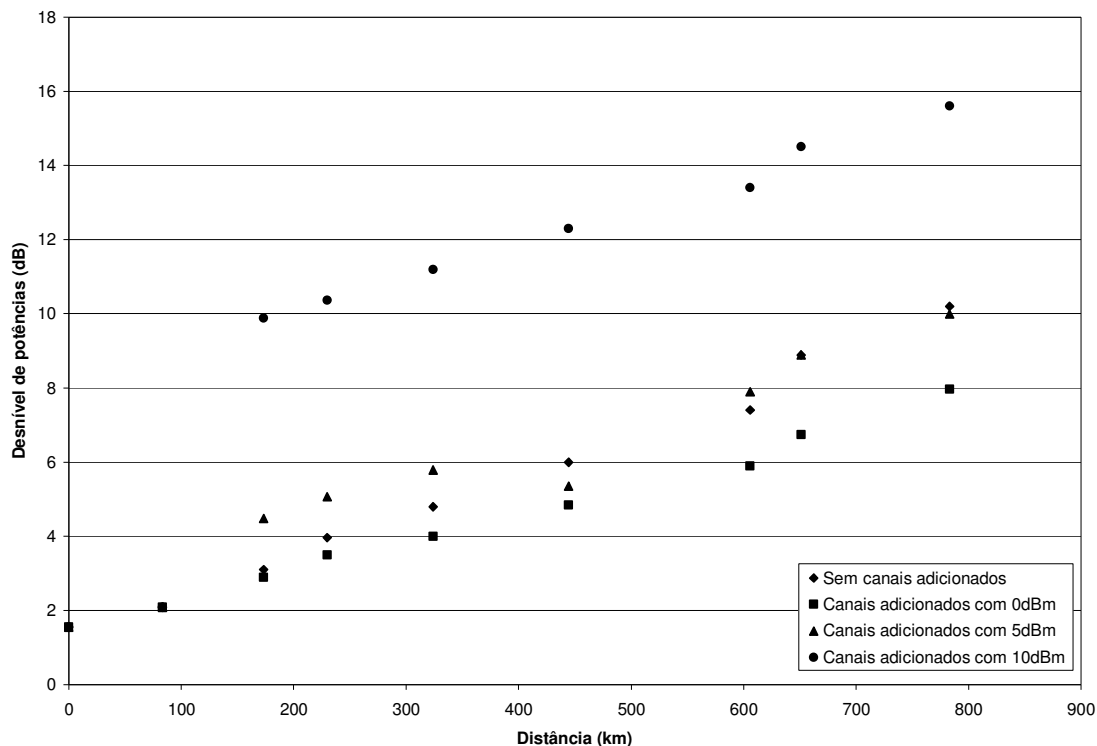


Figura 5.2: Desigualdade de potências na recepção sem equalização. Taxa de 10 Gbps com compensação de dispersão. Canais 1, 4, 5 e 8 adicionados com as potências indicadas.

Distância do enlace de 783 km.

Como mostra a figura 5.2, as potências óticas no ponto 0km já possuem uma diferença de potências, isso ocorre pois a simulação foi feita com canais sendo lançados na fibra com potências óticas desiguais. Em São Paulo, canais são retirados e reinseridos na fibra, com potências óticas de 0dBm, 5dBm e 10dBm. Neste ponto, é perceptível que o desnível de potências aumenta de acordo com a potência inserida. O desnível de potência se acumula ao longo do enlace. O desnível é considerado como sendo a diferença entre a maior e a menor potência medida.

Essa figura mostra um fato de grande interesse. É perfeitamente visível que o desnível de potências diminui com a inserção de canais com 0dBm no *Add/Drop*. O que explica esse fato é uma equalização natural que ocorre quando os canais que vêm pelo enlace são retirados. Nesse ponto já existe um grande desnível de potência acumulado nos amplificadores, quando os canais são reinseridos com potências de 0dBm eles se aproximam mais dos demais. Para provar esse fato, basta verificar que quando os canais são recolocados com potências de +5dBm o desnível é praticamente o mesmo que para o caso quando nenhum canal é inserido.

Pode-se comparar então o que ocorre com o OSNR quando os canais são adicionados na rede com potências muito diferentes daquelas que já estão presentes nos enlaces. Essa comparação é mostrada na figura 5.3, para os mesmos parâmetros anteriores. Novamente o resultado indica que a melhor relação de OSNR ocorre quando os canais 1, 4, 5 e 8 são retirados e reinseridos com potências óticas de 0dBm. Neste caso, as diferenças de OSNR entre os canais é menor. Na verdade, esse fato nos leva a imaginar se o OSNR não pode também ser equalizado, e isto será discutido mais a frente, neste mesmo capítulo.

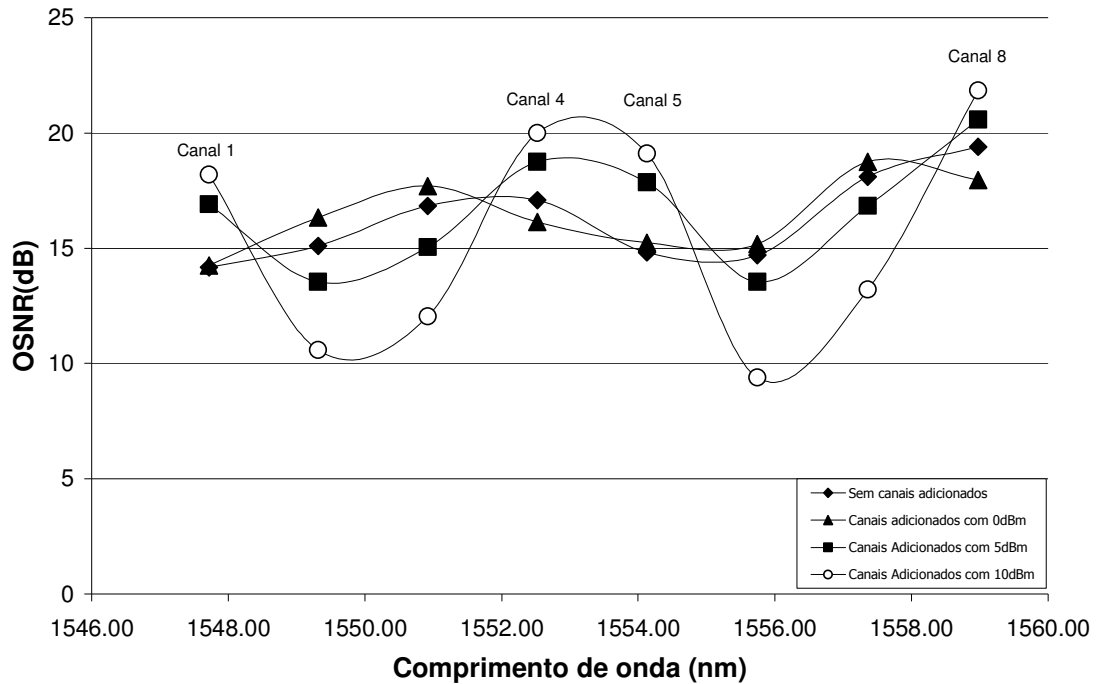


Figura 5.3: OSNR por canal transmitido, medido no receptor, sem equalização. Taxa de 10 Gbps com compensação de dispersão. Canais 1, 4, 5 e 8 adicionados com as potências indicadas. Distância do enlace de 783 km.

Um fato que pode ser percebido é degradação dos canais que não são removidos e circulam no enlace desde Campinas até a recepção no Rio de Janeiro (canais 2, 3, 6 e 7), à medida que aumenta a potência dos canais inseridos em São Paulo. O desnível de potência neste caso é tão grande que acaba gerando um *crosstalk* muito forte, e o ruído entre os canais causa uma degradação no OSNR, que para o pior caso é 9,38 dB, para o canal 6. Por esse motivo, quando as potências óticas estão muito próximas o OSNR sofre uma melhora. Nesta situação, o menor OSNR conseguido é de 14,25 dB, para o canal 1. Além disso, usando

potências muito altas existe uma saturação dos amplificadores e um menor ganho está disponível para os comprimentos de onda do enlace. Assim, as portadoras que percorrem todo o enlace passam a ter menor regeneração, chegando ao receptor com potências mais baixas. O ruído acumulado nos canais inseridos é menor, devido a menor número de estágios de amplificação por onde passam e, portanto, sofrem menor influência da ASE dos amplificadores. Com potências óticas levadas a extremos, com a adição dos canais com 10dBm de potência, o OSNR destes canais tende a ser melhor que dos demais, ficando em um mínimo de 18,18dB, para o canal 1.

Operando agora com o EDPO conectado em pontos estratégicos da rede, pode-se verificar sua influência no enlace. Para efeitos de comparação, as simulações foram executadas com um EDPO na recepção e, posteriormente, com um EDPO também após o *Add/Drop* em São Paulo, sendo que os canais inseridos têm potência de 5dBm. O resultado esperado sem equalização também é mostrado no gráfico da figura 5.4.

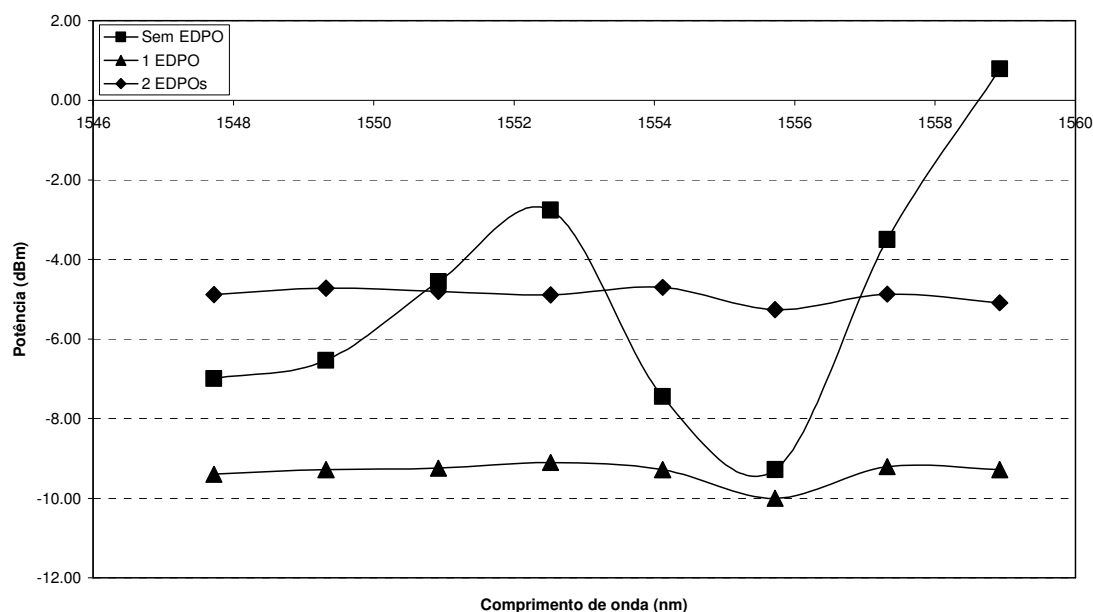


Figura 5.4: Potência dos canais no receptor com nenhum, um e dois EDPO's instalados. Taxa de 10 Gbps com compensação de dispersão. Canais 1, 4, 5 e 8 adicionados no *Add/Drop* em São Paulo com as potência de 5dBm. Distância do enlace de 783 km.

Esse resultado é importante, pois mostra que com dois Equalizadores na rede é possível conseguir potências mais altas no receptor. À primeira vista, esse resultado pode parecer estranho, considerando que a inserção de um equalizador desse modelo agrega uma perda de 7dB (contando demultiplexador e multiplexador) no enlace, e seria esperado que as

potências refletissem isso. Entretanto, esse resultado é facilmente explicado. Quando os canais são inseridos no *Add/Drop* com potências muito altas (nesse caso 5dBm por canal), os canais que continuam no enlace vão experimentar uma amplificação menor, devido à saturação dos amplificadores. Para o caso apresentado na figura 5.4, o canal 6 chega com uma potência de aproximadamente -10dBm no receptor. Esse canal é imediatamente tomado como referência pelo equalizador, que atenua os demais canais. Com apenas um EDPO na recepção é exatamente isso que ocorre, e pode-se perceber que o canal 6 foi tomado com referência, pois ele se apresenta 0,9dB abaixo dos demais canais após a equalização. Se dois EDPO's são utilizados na rede, um na recepção e outro estrategicamente colocado na saída do *Add/Drop* em São Paulo, este último impedirá que potências muito altas sejam lançadas na fibra. Nesse caso o equalizador tomará como referência um dos canais do enlace, que possua menor potência, e forçará nos canais adicionados uma atenuação, de forma que na saída do *Add/Drop* os canais estejam equalizados.

Assim, a alteração do perfil de ganho dos amplificadores na seqüência não sofrerá grandes alterações, e os canais terão maior potência quando chegarem ao receptor. O EDPO colocado no receptor fará a mesma coisa que o anterior, equalizando as potências baseado no canal de referencia (que ainda é o canal 6, com potência de -5,26 dB), porem a potência desse canal agora é maior e a atenuação aplicada aos demais acaba sendo menor, chegando ao resultado mostrado na figura 5.4. O desnível de potências neste caso é de 0,56dB.

O impacto desse resultado no OSNR do sistema é verificado na figura 5.5. Percebe-se que o ganho conseguido aparece de forma mais significativa quando o equalizador é colocado na saída do *Add/Drop* em São Paulo e na recepção. Neste caso, o menor OSNR é 17,5 dB. Para apenas uma etapa de equalização a melhoria conseguida para o OSNR é quase imperceptível e o menor OSNR é 15,53 dB. Sem equalizadores no enlace, o menor OSNR é de 15,16 dB, o que mostra que um único equalizador colocado neste ponto não agrega ganhos significativos para o enlace.

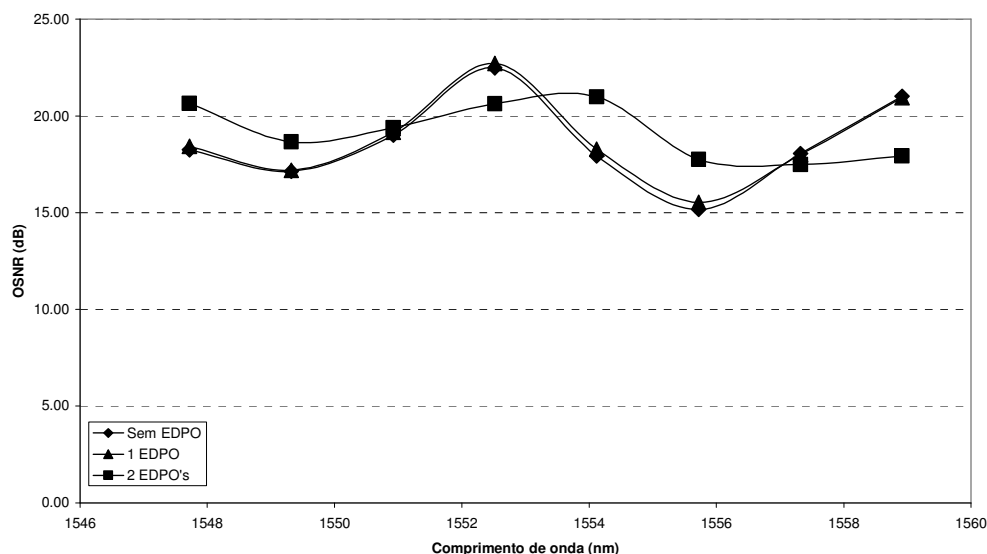


Figura 5.5: OSNR x comprimento de onda, com e sem equalizadores inseridos no enlace.

A tabela 5.1 mostra um comparativo dos resultados do enlace, mostrando uma melhora da ordem de 2 dB no OSNR mínimo. Esse resultado é interessante uma vez que a equalização do OSNR não é o foco deste trabalho, que tem como objetivo apenas a equalização das potências do enlace.

Tabela 5.1: Comparativo dos resultados de equalização. Taxa de 10 Gbps com compensação de dispersão. Canais 1, 4, 5 e 8 adicionados no *Add/Drop* em São Paulo com as potência de 5dBm. Distância do enlace de 783 km.

	OSNR Máximo (dB)	OSNR Mínimo (dB)	Desnível de potências (dB)	Desnível de OSNR (dB)
Sem EDPO	22.47	15.16	10.07	7.32
1 EDPO	22.70	15.53	0.90	7.18
2 EDPO's	20.99	17.50	0.56	3.49

Mais uma vez os resultados apontam para uma equalização do OSNR. Considerando que esse fato ocorre quando aumentamos a quantidade de equalizadores presentes na rede, é de se esperar que, se a equalização for mantida durante todo o percurso, o OSNR tende a se equalizar.

Para tentar demonstrar esse fato, foi criada uma nova simulação no VPI. Criando um *loop* contendo um amplificador, um atenuador que representa o papel da fibra e um equalizador. A cada volta do sinal óptico inserido ele é equalizado, simulando o que aconteceria se um equalizador fosse colocado em cada ponto de amplificação de uma rede. A figura 5.6 mostra o modelo completo, incluindo os visualizadores (medidores de potência e analisador de canal). A simulação é feita no *loop* para que os resultados fossem alcançados mais facilmente. É inviável a utilização dos EDPOs simulados em todos os pontos de amplificação óptica da rede Giga, devido ao tempo e capacidade de processamento necessário para que a simulação mostrasse algum resultado. Com o *loop* usa-se apenas um EDPO e um EDFA e a simulação é executada mais rapidamente.

Um atenuador óptico é usado no lugar da fibra. Isso reduz o tempo de simulação do sistema. O ruído gerado na fibra é desprezível quando comparado ao ruído ASE gerado pelo amplificador após 10 voltas no *loop*, que representa o maior fator de degradação. Com a inserção da fibra na simulação, o OSNR experimenta uma redução de 0.8dB em média.

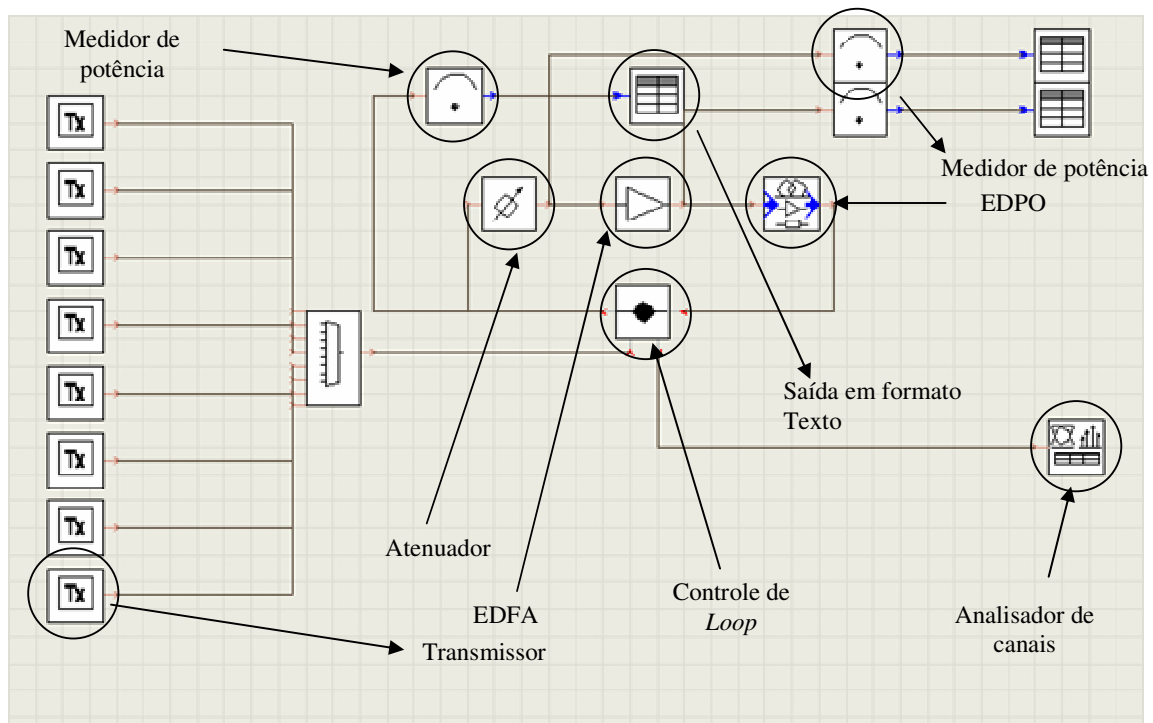


Figura 5.6: *Loop* de amplificação simulado.

O Atenuador insere 10dB de perda por volta e o EDFA utilizado foi configurado com ganho fixo de 10dB, recuperando a perda inicial. A perda de inserção do EDPO não foi considerada para essa simulação. O sinal óptico gerado por oito canais WDM, com as mesmas

configurações utilizadas até aqui, executa 10 voltas no *loop* e depois segue para a recepção. Isso é equivalente a um percurso de aproximadamente 500km.

A Tabela 5.2 apresenta o resultado obtido com essa simulação. À medida que o sinal vai dando voltas no *loop* o ruído acumulado aumenta, aumentando a potência percebida pelo fotodetector, distorcendo a equalização. Por outro lado, como o ruído também é considerado no cálculo, o resultado tem impacto direto no OSNR, que está equalizado, mostrando desnível máximo de aproximadamente 2 dB, enquanto para o sistema sem equalização o desnível máximo é de aproximadamente 8 dB.

Tabela 5.2: Resultado de equalização no *loop* com e sem equalização.

Canais	Potência (dBm) sem EDPO	Potência (dBm) Com EDPO	OSNR (dB) Sem EDPO	OSNR (dB) Com EDPO
1	2,34	-19,22	15.98	17.88
2	-5,62	-15,74	12.30	18.29
3	-10,10	-12,12	10.59	19.56
4	-11,19	-11,32	10.67	19.54
5	-12,43	-13,50	10.98	18.20
6	-18,10	-12,28	8.03	19.40
7	-15,00	-12,32	9.11	19.84
8	-10,39	-17,66	9.01	18.30
Variação	12,73	7,9	7,95	1,96

O resultado apresentado aqui é exatamente o mesmo (com parâmetros diferentes) do resultado simulado de Chraplyvy (CHRAPLYVY, NAGEL e TKACH, 1992), apresentado na figura 1.1, na introdução deste trabalho, que mostra a equalização do OSNR em detrimento a equalizações das potências.

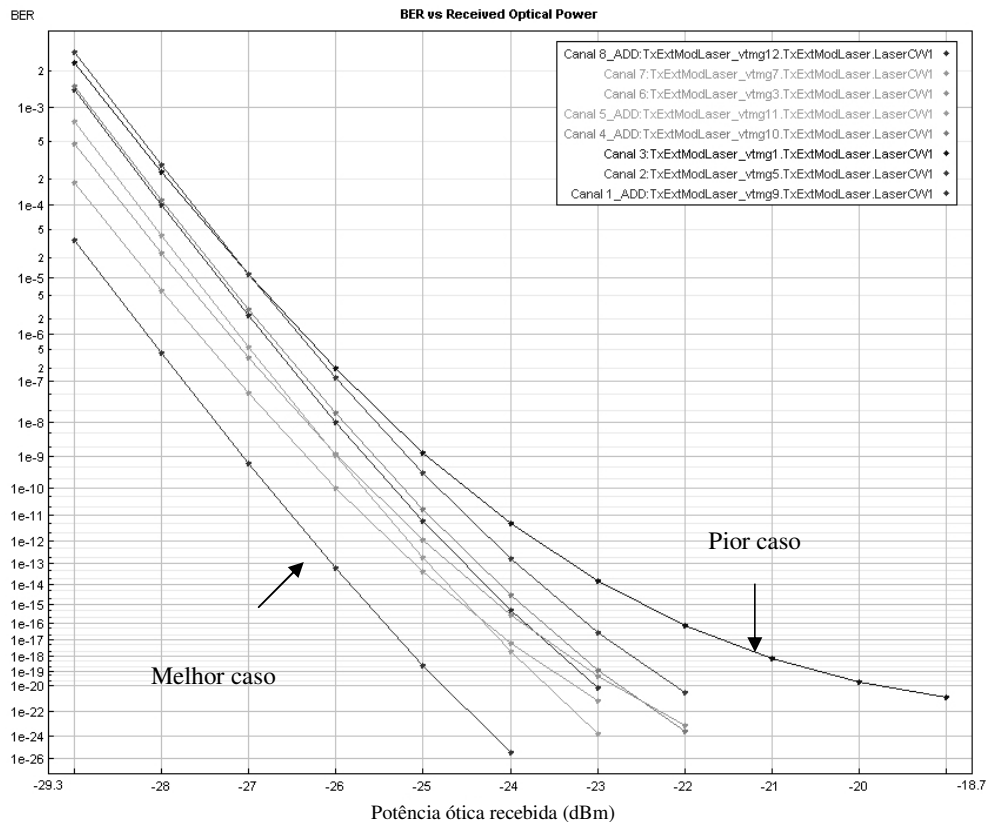
O impacto da equalização também é avaliado em termos da BER do enlace. Os resultados são apresentados na figura 5.7 para a Rede Giga com e sem EDPO's presentes (Fig 5.7a e 5.7b, respectivamente), com canais inseridos no *Add/Drop*, para o pior caso e o melhor caso.

Pode-se ver que para uma BER de 10^{-9} , que significa 1 bit errado a cada 1 bilhão de bits transmitidos, a potência óptica recebida deve ser maior ou igual a -25dBm.

Inserindo os equalizadores, de forma a obter o resultado com melhor desempenho em termos de OSNR, percebe-se que agora, para uma BER de aproximadamente 10^{-9} , o valor da potência ótica recebida deve ser de aproximadamente -27dBm , representando um ganho de 2dB na potência do canal.

Observa-se que a diferença máxima entre potências é reduzida em aproximadamente 5dB e as diferenças no OSNR são reduzidas em 6dB .

Com a equalização espectral de potências, os erros devidos a calibração do limiar do receptor são reduzidos, assim como o *crosstalk* linear nos filtros de entrada do receptor. É esperada uma melhora caso o sistema também possua controle automático de ganho nos amplificadores de linha (equalização temporal). Isso afeta a ainda mais a calibração dos receptores e insere erros no enlace. No momento em que as potências de entrada dos amplificadores variam o ganho também varia. O corte de um ou mais canais, por exemplo, pode resultar no aumento do ganho e conseqüentemente em maior amplificação das potências óticas sobreviventes, podendo resultar em descalibração do receptor ou permitir a geração de efeitos não lineares nas fibras.



(a)

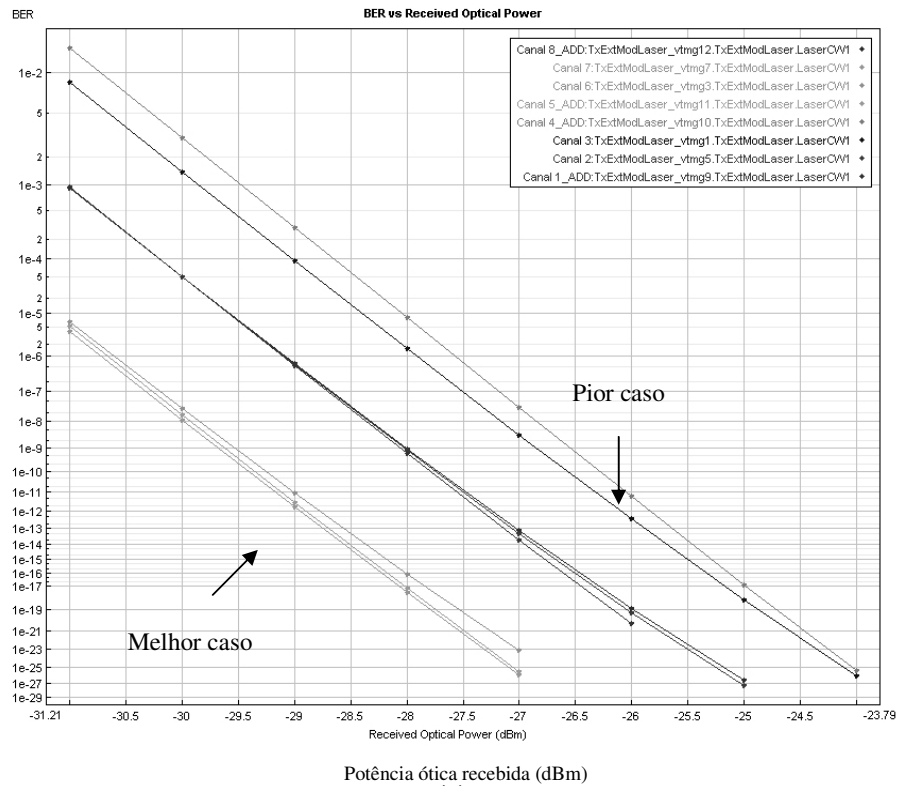


Figura 5.7: Comportamento da BER. (a) sem equalizadores e; (b) com equalizadores.

5.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A primeira versão do EDPO foi desenvolvida em vários blocos separados para facilitar a operação de desenvolvimento, a figura 5.8 apresenta o sistema montado com seus blocos interligados.

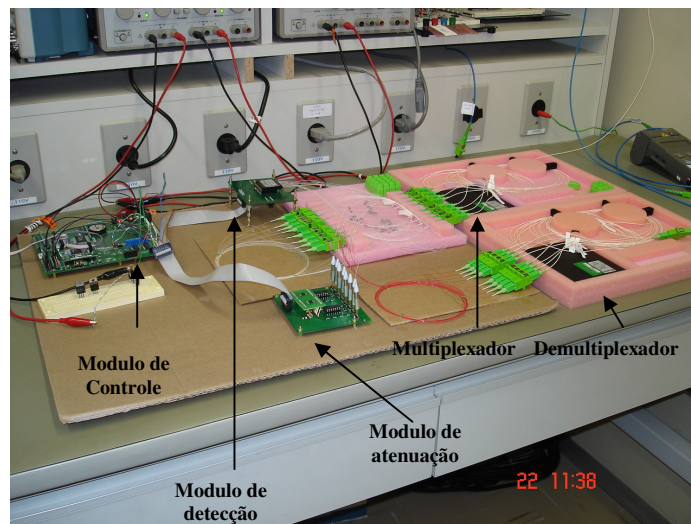


Figura 5.8: EDPO versão 1, montado em bancada.

À esquerda está o bloco de controle do sistema, no meio e acima se encontra o sistema de aquisição de potências e abaixo o bloco de atenuação. Os demais componentes são os multiplexadores e demultiplexadores, além das conexões com as fibras, medidor de potência e analisador de espectro ótico.

O sistema de equalização pode operar equalizando os canais de forma automática, baseado nas potências óticas lidas pelo bloco de detecção e aplicando atenuação nos canais de forma que as potências sejam iguais na saída.

É possível também configurar manualmente as atenuações de cada canal, via interface serial ou interface ethernet. Ainda, pode-se configurar a potência de saída de cada canal, que o equalizador tentará manter desde que a potência de entrada não seja menor que a potência de saída configurada, pois o sistema não insere nenhuma amplificação.

Com esse sistema montado foi inicialmente verificado o seu funcionamento como equalizador dinâmico. Para tanto, o banco de canais do laboratório da UTFPR foi utilizado. Este equipamento possui as mesmas frequências que se apresentam na Rede Giga, o banco de canais foi programado, via interface GPIB (*General Purpose Interface Bus*), através de um aplicativo desenvolvido no laboratório. O diagrama de teste é apresentado na figura 5.9. Esse programa altera aleatoriamente as potências óticas dos canais, forçando o equalizador a alterar as atenuações de entrada para igualar as potências na saída. Um exemplo disto é apresentado na figura 5.10 que é a imagem da tela do OSA (*Optical Spectrum Analyser*).

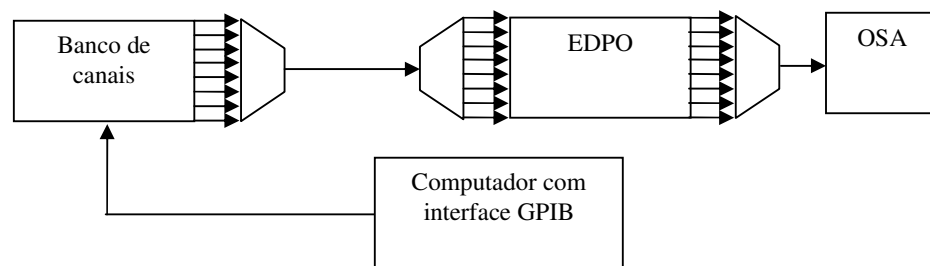
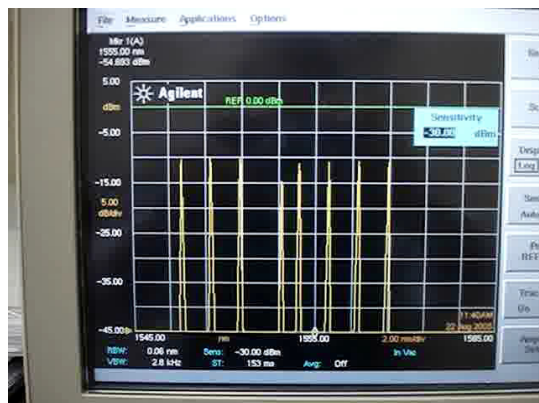


Figura 5.9: Diagrama de montagem de teste



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.10: Atuação do EDPO em laboratório. (a) Perda de potência no Canal 4; (b) Equalização dos canais; (c) Perda de Potência no Canal 6 e; (d) Re-equalização.

É possível perceber que a potência média na saída é mantida. O canal que sofre alteração de potência no banco de canais apresenta um desvio de comprimento de onda, retornando ao normal logo em seguida. Isso é uma característica interna do banco de canais que ocorre sempre que uma potência é alterada, quando o controle de ganho do banco de canais é ativado. Esse desvio não altera o funcionamento do EDPO, apenas aumenta o tempo total de equalização, uma vez que com o desvio de potência, o canal se desloca para a região de corte do filtro de entrada do sistema e sua potência é reduzida. Depois do equilíbrio o EDPO equaliza novamente todas as potências.

Para esse teste foram medidos os tempos de resposta do circuito e a diferença máxima de potência ótica entre os canais. O tempo de resposta do sistema para pequenas variações de potência é de aproximadamente 2ms. A diferença máxima de potências entre canais

conseguida no processo de equalização foi de aproximadamente 1,2dB com média em torno de 0,81dB (tabela 5.3).

Operando em modo manual foi possível adquirir o erro apresentado pelo sistema. Nesse modo é informada ao sistema qual a potência deve ser jogada na saída, e uma vez medida a potência de entrada, o erro é encontrado. A tabela 5.3 mostra alguns desses valores obtidos das medidas.

Tabela 5.3: Erro de medida do EDPO

Pot. reg. (dBm)	Diferença de potência por canal em relação ao valor regulado (dB)								Diferença entre extremos (dB)
Canal	1	2	3	4	5	6	7	8	
-10	0	-0.13	-0.2	-0.21	0.17	0.03	-0.19	0.32	0.53
-12	0.11	-0.16	-0.33	0.05	0.11	0.48	0.08	0.29	0.81
-14	0.16	-0.36	-0.23	0.13	0.36	0.4	0.21	0.05	0.76
-16	0.29	-0.37	-0.17	0.13	0.34	0.01	0.2	0.08	0.71
-1	0.06	-0.39	-0.19	0.21	0.62	0.22	-0.22	0.22	1.01
-5	0.38	-0.22	-0.09	0.13	0.46	0.4	-0.22	0.23	0.68
-9	0.2	0.05	-0.09	0.02	0.15	0.35	-0.1	0.24	0.45
-13	-0.07	0.04	-0.33	0.02	0.28	0.47	-0.19	0.1	0.80
-10	-0.36	0.34	0.4	0	-0.28	0.38	-0.34	-0.25	0.76
-12	-0.28	-0.8	-0.08	0.27	-0.03	0.28	-0.88	-0.27	1.16
-14	-0.18	-0.38	0.1	0.48	0.23	0.02	-0.4	0.07	0.88
-16	0.05	-0.41	-0.09	0.55	0.06	-0.04	-0.33	0.15	0.96
3	-0.38	-0.49	-0.37	0.68	0.23	0.38	-0.13	0.15	1.17
-2	-0.43	-0.01	0.13	0.4	0.22	0.47	-0.42	0.32	0.90
-6	-0.57	0.36	0.25	0.44	0.08	0.15	-0.05	0.22	1.01
-11	0.02	-0.04	0.39	0.16	0.15	0.05	-0.19	0.25	0.58
-13.5	0.39	-0.13	0.08	0.1	0.28	0.24	-0.04	0.05	0.52
Média	-0.0358824	-0.1823529	-0.0482353	0.2094118	0.2017647	0.2523529	-0.1888235	0.1305882	0.8052941

O erro do EDPO é oriundo principalmente da não linearidade dos componentes óticos e a desigualdade entre eles.

O tempo de resposta do EDPO, para grandes valores de atenuação, cresce de forma significativa. O atenuador utilizado tem tempo máximo de resposta da ordem de 10ms para sair de atenuação nula para atenuação máxima (40dB). A medida do tempo de resposta do sistema é de aproximadamente 1 ms para 4 dB de atenuação e aproximadamente 2.5 ms para 14 dB de atenuação. Para esses valores de atenuação o tempo de resposta aumenta em 2,5 vezes. Esse fato não chega a prejudicar muito o desempenho do sistema. Isso porque as maiores atenuações ocorrem sempre no momento que os canais são conectados ao equalizador, nesse instante é onde há a maior diferença de potências entre os canais. Depois disso o equalizador apenas mantém a potências equilibradas variando pouco a atenuação dos

VOA's, a não ser que a potência de um canal sofra uma variação muito grande, o que não deverá ocorrer em um enlace. Se um canal for cortado do enlace a sua potência fica abaixo do valor mínimo, que pode ser ajustado no equalizador e não é considerado para o cálculo da equalização. É possível também informar previamente o equalizador, via interface de controle, de que um ou mais canais estão desligados. O tempo de resposta de 2ms citado anteriormente relaciona-se com uma atenuação de aproximadamente 7dB.

A figura 5.11 mostra o EDPO finalizado e montado em uma mecânica para fixação em rack de 19 polegadas. O sistema conta com o uma interface homem maquina composta de *display*, teclado e 8 indicadores de canal. Essa interface serve para acesso local à funcionalidades do equipamento. Através desta, é possível configurar atenuações, ligar e desligar canais, configurar as potências mínimas para equalização automática, realizar atenuação forçada em qualquer canal, medir as potências dos canais de entrada e de saída. Por essa interface obtém-se também os valores das potências óticas e atenuações instantâneas. A interface serial localiza-se no painel frontal do equipamento, e provê acesso via *software* às características do equipamento, incluindo calibração.

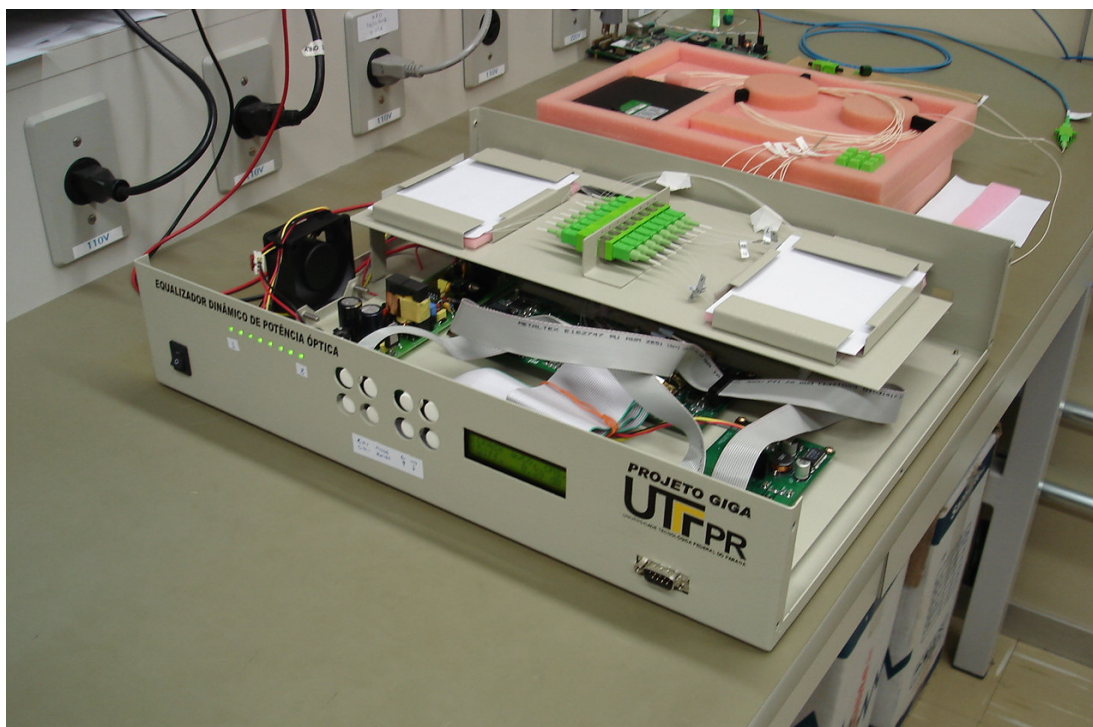


Figura 5.11: Protótipo final do EDPO.

5.3 CONCLUSÕES

Este trabalho mostra uma análise das características dinâmicas de enlaces óticos derivados dos sistemas de amplificação baseados em fibra dopada com érbio. Conforme mencionado, esses amplificadores inserem certo número de variáveis nos sistemas óticos, que necessitam ser tratadas com cuidado. A variável equalização é o ponto focal deste trabalho, verificando os impactos que influenciam diretamente a boa operação das redes óticas.

Um fator de extrema importância é o perfil de ganho irregular dos amplificadores a fibra dopada. Essa característica restringe o uso de toda a banda de amplificação do EDFA, impedindo a inserção de um maior número de comprimentos de onda nos sistemas.

Foram apresentados modelos de planificação de ganho utilizados atualmente e que apresentam bons resultados. O modelo proposto por este estudo para um equalizador dinâmico de potências óticas pode obter essa planificação de forma muito eficiente. Ainda, o modelo proposto mostra-se capaz de adaptar-se a variações do perfil de ganho, mantendo não somente o perfil planificado como todas as potências óticas em um mesmo patamar. Em testes laboratoriais, o sistema apresentou uma diferença máxima de potência ótica da ordem de 1,2dB. O sistema implementado não é isento de erros, então, se for considerado o erro médio de leitura das potências, cujo valor é 0,23dB, obtém-se uma excursão de valores diferenciais de potência entre 1,43dB e 0,98dB. A tabela 5.4, a seguir, mostra um comparativo entre os resultados deste e de outros trabalhos sobre equalização, com diferentes modelos de equalizador, usando diferentes tecnologias.

Tabela 5.4: Quadro comparativo de resultados com equalizadores

Modelo Utilizado	Diferença de potências	Tempo de resposta	Referência
Equalização com VOA's	1.2dB	2ms	Este trabalho
Grades de Bragg com gorgeio em fibra	0.25 dB	Passivo	ROCHETE, GUY, La ROCHELLE <i>et al.</i> , 1999
Filtros acusto-óticos	1dB	0.1 μ s	CAI, FENG CHEN <i>et al.</i> , 1997
Atenuador a cristal liquido	0.15dB	<500 μ s	MAO, XU , FENG <i>et al.</i> , 2001

Quanto às restrições inseridas nas redes óticas, devido a não equalização das potências dos canais, este estudo mostra resultados significativos. A figura 5.5 e a tabela 5.1 mostram uma melhora no equilíbrio da relação sinal ruído ótico, reduzindo o desnível do OSNR de

7.32 dB, sem equalização, para 3,49 dB, obtido na presença de equalizadores na rede, colocados no *Add/Drop* em São Paulo e na recepção. As simulações efetuadas apontam para uma equalização do OSNR quando as potências dos canais são mantidas aproximadamente iguais ao longo de todo o enlace. Esse fato é apresentado na figura 5.7, que é resultado da simulação de um *loop* de fibra, onde o sinal dá 10 voltas e a cada volta uma nova equalização é efetuada, mantendo as potências óticas equilibradas durante todo o enlace. Esse resultado confirma os resultados de trabalhos encontrados na literatura (CHRAPLYVY, NAGEL e TKACH, 1992).

Através das simulações com o equalizador modelado foi possível conseguir melhorias na sensibilidade, para o caso da Rede Giga em até 2dB para a potência mínima devido ao aumento do OSNR, reduzindo de -25dBm para -27dBm a potência mínima capaz de manter a BER na ordem de 10^{-9} .

No caso de redes dinâmicas, com a existência de *Cross Connects* e *Add/Drops* óticos, o sistema apresenta uma boa contribuição para melhorar o desempenho da rede. As simulações apontam para um ganho de potência na recepção, quando são inseridos canais com potências muito altas na rede (figura 5.4) quando mais de um EDPO é utilizado.

Considerando todos os fatores apresentados, o modelo apresentou ganhos em quase todos os pontos de interesse para este trabalho. Entretanto, a variável relacionada aos transientes de ganho dos EDFA não pôde ser corrigida. Para tanto, é necessário uma outra forma de controle que atue diretamente no amplificador, corrigindo as variações de ganho. Isso pode ser feito via controle de bombeamento eletrônico, controle totalmente ótico de ganho, ou mesmo uma técnica híbrida destes métodos. O equalizador desenvolvido pode equalizar as potências e ajudar na planificação do perfil, porém não pode impedir que o perfil mude, isto é, não pode reduzir transientes..

Se for considerado um controle de transientes de ganho totalmente ótico, o sistema está sujeito a fenômenos como oscilações de relaxação e *Spectral Hole Burning*. Neste caso, o tempo de resposta (aproximadamente 2ms) do sistema desenvolvido é demasiado alto para que possa fazer a correção. As oscilações de relaxação têm duração média de 300 μ s, porém o menor tempo de oscilação pode chegar a menos de 10% desse valor, dependendo da amplitude da variação de ganho. Isso implicaria em um sistema equalizador que opere com tempo de resposta abaixo dos 30 μ s. Trabalhos recentes mostram o impacto negativo do tempo de resposta dos equalizadores (PAVEL,2003), em que o uso de equalizadores com resposta rápida pode induzir oscilações de relaxação mais constantes no enlace, enquanto os

equalizadores com resposta mais lenta tendem a reduzir as oscilações. Além disso, o modelo de equalização utilizado influencia diretamente a eficácia do sistema.

O modelo proposto neste trabalho ainda pode ser utilizado, mas é preciso mudanças significativas em todo o circuito eletrônico (circuitos mais rápidos) e nos componentes de atenuação, para que o tempo de resposta seja reduzido quando há a necessidade de grandes variações de atenuação. Dispositivos do tipo MEMS não poderão ser utilizados, pois, por se tratar de um dispositivo mecânico, normalmente possui tempo de resposta demasiado elevado. O uso de outros dispositivos não é previsto neste trabalho.

Os resultados encontrados e a pesquisa feita sobre controle de transientes nos amplificadores levam a um modelo híbrido, que une equalização e controle de transientes. A princípio, utilizar um controle eletrônico de bombeamento no amplificador e um equalizador em sua saída parece ser o melhor método, mas para confirmação desse fato novos estudos e testes devem ser feitos.

Como sistema, o EDPO passa a ser muito mais que um equalizador. Devido às funcionalidades implementadas no sistema ele passa a ter comportamento semelhante a sistemas de supervisão ótica. É possível efetuar medida de potência nos canais separadamente, pode-se colocar atenuação máxima para qualquer canal (até 40dB), forçando um corte e ainda, é possível indicar perda de potência nos canais, com a integração ao plano de controle das redes, além de outras características que podem vir a ser implementadas.

Nesse formato o sistema pode ser inserido em OADM's e OXC's, contribuindo para a melhora do OSNR nestes pontos e ainda, podendo fornecer informações pertinentes a rede para os operadores.

Como grande desvantagem, o modelo construído apresenta limitação quanto à quantidade de canais. O sistema desenvolvido suporta expansão para 16 canais WDM. Uma quantidade maior de canais é possível. Na verdade, não há limitação técnica quanto a quantidade de canais. O que existe é a limitação física, pela quantidade de atenuadores e fotodetectores que seriam necessários, e uma limitação econômica, pelo mesmo motivo. Na teoria, é possível construir um sistema de controle que suporte 2ⁿ canais. Como o modelo desenvolvido não é dependente do comprimento de onda, da taxa de transmissão e do espaçamento entre canais, é possível agregar mais de um equipamento na mesma rede, como por exemplo, quatro sistemas de 16 canais somando um total de 64 canais WDM a serem equalizados.

5.4 TRABALHOS FUTUROS

O primeiro trabalho a ser feito refere-se à inclusão do EDPO construído na Rede Giga, que até o presente momento não foi possível, validando os resultados dos testes experimentais, concluindo os resultados deste trabalho.

Sugere-se como trabalhos futuros um estudo do comportamento de sistemas equalizadores híbridos, que agregam funcionalidades de equalização e controle de ganho dos amplificadores a fibra dopada com érbio, utilizando controle totalmente ótico e controle eletrônico de bombeamento. Dessa forma é possível verificar qual modelo de controle de ganho oferece melhores resultados em conjunto com o equalizador. Além disso, um estudo sobre as características dos tempos de resposta dos equalizadores e seus impactos nas redes óticas também é considerado importante, com o intuito de melhorar os sistemas de equalização atuais e o próprio sistema desenvolvido neste trabalho.

Para o sistema projetado, fica como trabalho futuro a melhoria no tempo de resposta do sistema, alterando os circuitos eletrônicos de controle, tornando-os mais rápidos e com maior capacidade de processamento e memória, de forma a reduzir os erros impostos por cálculos aproximados de atenuação e potência.

Por fim, coloca-se uma idéia nova para o sistema. Uma vez realizadas as pesquisas sobre métodos de controle de ganho, é possível acrescentar ao EDPO existente esta funcionalidade, seja com a inserção de um laser de referência, ou com um controle de bombeamento interno. Assim o EDPO poderá operar em conjunto com os amplificadores a fibra dopada, controlando o ganho e equalizando as potências, em um único sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGRAWAL, G. P., BOYD, R. W., Contemporary Nonlinear Optics, 1st ed., Ed Academic Press, MA, USA, 1992.
- AGRAWAL, G. P., BOYD, R. W., Nonlinear Fiber Optics, 3rd ed., Ed Academic Press, MA, USA, 2001.
- AGRAWAL, G. P., BOYD, R. W., Fiber Optic Communication Systems, 3rd ed., Ed John Wiley & Sons, NY, USA, 2002.
- AMARAL, T. M., POHL, A. A. P., Análise de Circuitos de Fotodeteção para Aplicação em Medidas de Potência Ótica. XXII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Campinas, São Paulo, Setembro, 2005.
- ARIE, A., Dynamic Spectral Equalization Methods for WDM Systems, IEEE Laser and Electro-Optical Society – Summer Topical Meetings, 2002.
- BAKHSHI, B., VAA, M., GOLOVCHENKO, E. A., LI, H., HARVEY, G. T., Impact of Gain-Flattening-Filter Ripple in Long-Haul WDM Systems. Proc. 27th Eur. Conf. on Opt. Comm., p. 448-449, Amsterdam, 2001.
- BARNES, W. L., LAMING, R. I., TARBOX, E. J., MORTEL P. R., “Absorption and Emission Cross Section of Er³⁺ Doped Silica Fibers”, IEEE J. Quant. Elect., vol. 27, no. 4, p.1004-1010, April 1991.
- BONONI, A., RUSCH, L. A., Doped-Fiber Amplifier Dynamics: A System Perspective. IEEE Journal of Lightwave Technology. v. 16, n. 8, p. 945-955, May, 1998.
- BONONI, A., TANCEVSKI, L., RUSCH, L. A., Large Power Swings in Doped-Fiber Amplifiers with Highly Variable Data. IEEE Photonics Technology Letters. v. 11, n. 1, p. 131-133, January, 1999.
- BONONI, A., TANCEVSKI, L., RUSCH, L. A., Output Power and SNR Swings in Cascades of EDFA's for Circuit- and Packet-Switched Optical Networks. IEEE Journal of Lightwave Technology. v. 17, n. 5, p. 733-742, May, 1999.

- BOSTON APPLIED TECHNOLOGIES, Boston Applied Technologies website, disponível em www.bostonati.com. Acesso em 15 Outubro 2006.
- BOTHA, R. , Towards an integrated optic tuneable gain equalizer for erbium-doped fibre amplifiers, 2005, 153 f. Magister Ingenerae Dissertation, University of Johannesburg, South Africa, 2005.
- CHEN, Y. VISIONE, C. PAVLIK, R. AL-SALAMEH, D. TOMLIMSON, J., System Test of Dynamic Gain Equalizer in Long Haul Transmissiom, IEEE Laser and Electro-Optical Society – Summer Topical Meetings, p. MD3-8, MD3-9, 2002.
- CHRAPLYVY, A. R., NAGEL, J. A,TKACH, R. W. Equalization in Amplified WDM Lightwave Transmission Systems. IEEE Photonics Technology Letters, v. 4, n. 8, p.920-922, august, 1992.
- CHRAPLYVY, A. R., Limitations on Lightwave Communications Imposed by Optical-Fiber Nonlinearities. IEEE Journal of Lightwave Technology, v. 8, n. 10, p. 1548-1556, October, 1990.
- CHUNG, J., KIM, S. Y., CHAE, C. J., All-optical gain-clamped EDFAs with different feedback wavelengths for use in multiwavelength optical networks, Electronic Letters, v.32, n. 23, p. 2159-2161, 1996.
- DESURVIRE, E., SIMPSON, J. R., BECKER, P. C., High gain erbium-doped travelling wave fiber amplifier, Optics Letters, vol.12, no.11, pp. 888-890, 1987.
- DESURVIRE, E., Erbium-Doped Fiber Amplifiers - Principles and Applications, 1st ed., Ed.: John Wiley & Sons, NY, USA, 1994.
- DONATI, S., Photodetectors: Devices, Circuits, and Applications, 1st ed., Prentice Hall PTR. NJ, USA, 2000.
- FEI, Y., ZHENG, X., ZHANG, H., GUO, Y., ZHOU, B., A Novel Scheme of Power Equalization and Power Management in WDM All-Optical Networks. IEEE Photonics Tecnology Letters, v. 11, n. 9, p. 1189-1191, September, 1999.
- GUY, M., LAUZON, J., ROCHETTE, M., TRÉPANIÉ, F., Applications of Bragg gratings in optical amplifiers. Proc. SPIE v. 4087, p. 411, November, 2000.

- HECHT, J., *City of Light: The Story of Fiber Optics*, Oxford University Press, USA, 1999.
- JIN-XING CAI KAI-MING FENG XIAOPENG CHEN WILLNER, A.E. SMITH, D.A. CHAU-HAN LEE YUNG-JUI CHEN, Experimental demonstration of dynamic high-speed equalization of three WDM channels using acoustooptic modulators and a wavelength demultiplexer, *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 9, n. 5, p. 678-680, May, 1997.
- KOESTER, C. J., SNITZER, E. A., Amplification in a Fiber Laser, *Applied Optics*. v. 3, n. 10, p. 1182, 1964.
- LUO, G., ZYSKIND, J. L., NAGEL, J. A., ALI, M. A., Experimental and Theoretical Analysis of Relaxation-Oscillations and Spectral Hole Burning Effects in All-Optical Gain-Clamped EDFA's for WDM Networks. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, v. 16, n. 4, p. 527-533, April, 1998.
- LUO, G., ZYSKIND, J. L., SUN, Y., SRIVASTAVA, A. K., SULHOFF, J. W., WOLF, C., ALI, M.A., Performance degradation of all-optical gain-clamped EDFA's due to relaxation-oscillations and spectral-hole burning in amplified WDM networks, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 9, no. 10, pp. 1346-1348, 1997.
- MAO, C., XU, M., FENG, W., LIU, J., JUNG-CHING, C., LIN, L. ZHANG, S., Liquid-crystal optical switches and signal processors, *SPIE Proceedings Series, Optical switching and optical interconnection. Conference, Beijing , China, november, 2001.*
- MEARS, R. J., REEKIE, L., JAUNCEY, I. M., PAYNE, D.N, Low-noise erbium doped fibre amplifier operating at $1.54\mu\text{m}$ ", *Electronic Letters*, v. 23, n.19, p. 1024-1028, 1987.
- MEHTA, V., EDFA All-Optical Gain Control Methodologies, *Electrical and Computer Engineering ECE1654, Term Paper, April, 2003.*
- MENIF, M., RUSCH, L. A., KARÁSEK, M., Application of Preemphasis to Achieve Flat Output OSNR in Time-Varying Channels in Cascaded EDFAs Without Equalization. *IEEE Journal of Lightwave Technology*. v. 19, n. 10, p. 1440-1452, October, 2001.

- MOCKI JR, A.L., KALINOWSKI, H. J., POHL, A. A. P, Design and Simulation of an In-Line Optical Gain Equalizer for application in WDM Systems, Proceedings of 7th International Conference on Transparent Optical Networks, pp 221-224, 2005.
- MOCKI JR., A. L., AMARAL, T. M., POHL, A. A. P., 8-Channel Optical Power Equalizer for WDM Networks, VI International Telecommunications Symposium, pp 1033-1036, Fortaleza, Brazil, 2006.
- NETTEST, Nettet website, disponível em: www.nettest.com. Acesso em 02 outubro 2006.
- PAVEL, L. Control Design for Transient Power and Spectral Control in Optical Communication Networks. Proceedings of 2003 IEEE Conference on Control Applications. v. 1, p. 415-422, June, 2003.
- PAVEL, L. Effect of Equalization Control Strategy On Dynamic Response of Optical Networks. Proc. IEEE Laser and Electro-Optical Soc. Ann. Meeting. Glasgow, November, 2002.
- RICHARDS, D.H. JACKEL, J.L. ALI, M.A., Multichannel EDFA chain control: a comparison of two all-optical approaches, IEEE Photonics Technology Letters, v. 10, n. 1, p. 156-158, January, 1998.
- ROCHETTE, M., GUY, M., LAROCHELLE, S., LAUZON, J. AND TRÉPANIÉ, F., Gain equalization of EDFA's with Bragg gratings", IEEE Photonics Technology Letters, v. 11, n. 5, p. 536-538, May, 1999.
- SCARABUCCI, R.R., STANTON, M.A., DE BARROS, M.R.X., SALVADOR, M.R., ROSSI, S.M., SIMOES, F.D., ROCHA, M.L., DA SILVA NETO, I.L., ROSOLEM, J.B., FUDOLI, T.R.T., MENDES, J.M.D., CASTRO, N.F., MACHADO, I., REGGIANI, A.E., PARADISI, A., MARTINS, L., Project GIGA-high-speed experimental IP/WDM network, Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities, 2005. First International Conference on Tridentcom 2005, p. 242-251, February, 2005.
- SHIGEHARA, M., KENMOCHI, T., SANO, T., SUGANUMA, H., Variable Attenuation and Wavelength Filter, The 8th Microoptics Conference (MOC'01), October, 2001.

SHTAIF, M., MECOZZI, A., TKACH, R. W., Noise Enhancement Caused by Polarization Dependent Loss and the Effect of Dynamic Gain Equalizers, Optical Fiber Communication Conference, OFC2002, p. 48-50, May, 2002.

SUZUKI, K., KITO, T., SUZUKI, S., INOUE, Y., HIBINO, Y., SHIBATA, T., MORI, A., SHIMIZU, M., PLC-Based Dynamic Gain Equaliser consisting of integrated Mach-Zehnder Interferometers with C-band and L-band Equalising Range, Electronics Letters, v. 38, n. 18, p. 1030 – 1031, August, 2002.

VPI PHOTONICS, VPI Photonics website, disponível em: www.vpiphotonics.com. Acesso em 20 abril 2006.

YU, A. & O'MAHONY, M.J., Design and modelling of laser controlled erbium doped fibre amplifiers, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, v. 3, n. 4, pp.1013-1019, August, 1997.

WILLNER, A.E. HUANG, S.H. ZOU, X.Y. HWANG, S.-M. SMITH, D.A. BAO, Z. , Dynamic channel equalization in reconfigurable WDM networks using acousto-optic tunable filters, IEEE Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting, v. 2, p.180-181, November, 1996.

ZHOU, L., WANG, S., YU, Q., JIANG, Z., WANG, H., FAN, C., Influence of Power Transients From Gain-Clamped EDFA on Optical Receiver BER Performance. Communications Technology Proceedings. v. 1, p. 406-409, August, 2000.

ZHU, YINIAN., Fabrication of long-period gratings and their applications in optical fibre communications and sensing systems, 2002, 223 f., DPhil These, University of Johannesburg, South Africa, 2002.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)